

지하수 모니터링 이상변동 자료를 이용한 소규모 지진 영향 유추

우남철^{1*} · Piao Jize¹ · 이재민¹ · 이찬진² · 강인옥² · 최두형²

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²한국수자원공사 국가지하수정보센터

Abnormal Changes in Groundwater Monitoring Data Due to Small-Magnitude Earthquakes

Nam C. Woo^{1*}, Jize Piao¹, Jae-Min Lee¹, Chan-Jin Lee², In-Oak Kang², and Doo-Houng Choi²

¹Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University

²National Groundwater Information Center, Korea Water Resources Corporation

Received 2 January 2015; received in revised form 2 March 2015; accepted 13 March 2015

이 연구는 국내에서 운용되고 있는 지하수 장기관측망의 자동 관측자료를 이용하여, 발생빈도가 상대적으로 높은 M3.0 내외의 소규모 지진에 의한 영향과 지진 전조현상에 의한 지하수의 변화 관측 및 구분가능성을 평가하고자 수행되었다. 사용된 지하수 관측자료는 2012년 4월~6월 기간의 1시간 단위로 김천지좌, 강진성진, 공주정안 3개 관측소의 암반관측공에서 관측된 자료이다. 지하수위, 수온 및 EC 값의 시계열 자료에서 부분적으로 급격한 이상변동이 관측되었으며, 이 변동은 2012년 5월 30일 경북 영덕에서 발생한 M3.1 지진의 전조와 그 영향으로 해석된다. 그럼에도 불구하고 지진의 규모 및 발생위치와 관측공까지의 거리와 지하수 변동의 크기는 선형관계를 보이지 않으며, 이는 관측공 자체의 구조적 특성 과도 연관된다. 따라서 지진관측을 고유목적으로 하는 관측공의 설치, 운용이 필요하며, 이를 통한 장기적 모니터링은 지진 재난지역에서의 비상수자원 확보와 지하공간 안전성 확보의 기반정보를 제공할 수 있을 것이다.

주요어: 지진, 지하수 모니터링, 이상적 변화, 전조현상, 시계열 자료

This study tests the potential of detecting small-magnitude earthquakes (~M3.0) and their precursors using a long-term groundwater-monitoring database. In groundwater records from April to June 2012, abnormal changes in water level, temperature, and electrical conductivity were identified in the bedrock monitoring wells of the Gimcheon-Jijwa, Gangjin-Seongjeon, and Gongju-Jeongan stations. These anomalies could be attributed to the M3.1 earthquake that occurred in the Youngdeok area on May 30th, although no linear relationship was found between the scale of changes and the distance between each monitoring station and the epicenter, which is attributed in part to the wide screen design of the monitoring wells. Groundwater monitoring networks designed specifically for monitoring earthquake impacts could provide better information on the safety of underground space and on the security of emergency water-resources in earthquake disaster areas.

Key words: earthquakes, groundwater monitoring, abnormal changes, precursor, time-series data

*Corresponding author: ncwoo@yonsei.ac.kr

© 2015, 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/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

인류가 직면하고 있는 대규모의 자연재난들은 대부분이 어느 정도의 예측가능성을 보여주고 있으나, 상대적으로 지진 재난에 대해서는 그 예측가능성이 전문가들 사이에서 조차 회의적으로 인식되고 있다(Ingebristen and Manga, 2014). 이러한 이유로는, 지진은 그 발생 기작이 비선형적이고(Geller, 1997), 지진 예측을 위한 장기 관측시험에서도 전조현상을 발견하지 못하였기 때문이다(Bakun et al., 2005). 그러나 지진 발생 이전에 지각의 팽창과 변형에 의해 지하수의 화학적 변동이 일어날 수 있는 가능성은 충분히 존재하며, 실제로 1995년 M7.2의 고베 지진이 발생하기 전에 지하수의 라돈, 황산염, 염소 이온들의 농도가 급변한 것은 잘 알려져 있다(Igarashi et al., 1995; Tsunogai and Wakita, 1995). 또한 최근에 Skelton et al. (2014)은 Iceland에서 지진관측과 병행된 6년여 기간의 지하수 화학적 특성 변화의 장기 모니터링을 통하여 지진의 전조 현상으로 수소 안정동위원소비와 주 화학성분의 변동을 보고하였으며, 이러한 지하수의 화학적 특성 변화를 일으킨 기작으로 지진 전의 암반의 팽창에 따라서 신선한 암석 표면이 지하수에 노출되어 화학반응의 변화를 초래하거나, 또는 서로 다른 화학적 특성을 지녔던 지하수체가 혼합되어 발생할 수 있다고 제시하였다.

지진에 의한 지하수의 변동은 전 세계적으로 다양한 지역에서 보고된 바 있다. 일본(Kitagawa et al., 1996; King et al., 1999, 2000; Ohno et al., 1999, 2006; Itaba et al., 2008)과 중국(Che and Yu, 1992; Che et al., 1994, 2002; Liu et al., 2009; Wang et al., 2009), 대만(Chia et al., 2001; Huang et al., 2004), 미국(Brodsky et al., 2003), 인도(Chadha et al., 2008) 등에서 발생한 대규모 지진에 의한 지하수의 변동과 전조 현상의 규명을 위한 연구들이 지속적으로 수행되어 왔다. 이러한 대규모 지진의 영향은 진앙으로부터 수 천 km 떨어진 지역에서의 지하수에서도 감지되고 있어, 지진과 에너지가 지하수에 전달되는 메카니즘에 대해 아직도 적절한 해석이 어려운 상태에 있다. Wang and Manga (2010)은 원거리(far field)와 중거리(intermediate field)에서 나타나는 대부분의 지하수 변동은 주기적 변형(cyclic deformation)과 유체의 진동 흐름(oscillatory fluid flow)에 대한 반응으로 나타나는 매질의 투수성의 변화에 기인한다고 제시하였다.

한편 대규모 지진보다는 그 영향력은 작으나, 발생 빈

도가 높은 M5.0~6.0 정도의 중규모 지진에 의한 지하수 반응도 계속 보고되고 있으며(Sun et al., 1997; Ma et al., 2008; Singh, 2008), 이러한 경우 지진 에너지 확산에 따른 공극압의 변동을 지하수위의 변동 메카니즘으로 해석한 바 있으며, 이보다 규모가 작은 소규모 지진에서도 지하수의 변동이 발생할 수 있다고 하였다(Ramana et al., 2007).

현재 우리나라의 지하수 장기관측은 소유역 단위에 지하수의 흐름 경로를 고려하여 관측정이 설치된 국가 지하수관측망에서 수행 중이다. 이 지하수 관측망은 1995년부터 유역단위별로 관측망을 구축하여 주기적으로 관측자료를 획득하고 있으며, 이는 유역별 균등배치, 수문지질 조건의 대표성 여부, 지하수 이용특성과 시설의 유지관리의 기본조건을 만족시키는 기준에서 지하수 함양과 배출지역에 각각 설치하여 유역을 대표한 광역적 수문지질 특성 분석을 기본 목표로 설치, 운용되고 있다(국가지하수정보센터, GIMS; <http://www.gims.go.kr/>). 이 관측시스템에서는 자동관측장비를 이용하여 수위, 수온 및 전기전도도를 통한 배경 지하수위/수질을 1시간 단위로 관측하고 있으며, 자동관측장비를 통해 획득된 원자료는 원격자료송신 방식으로 한국수자원공사의 지하수정보센터로 실시간 송신된다. 이렇게 취득된 자료는 지하수정보센터로 이송되며, 지하수정보센터에서는 이들을 취합하고 체계적인 분석을 통해 전국 지하수의 수위와 수질 변화에 대한 정보를 사용자들에게 제공한다. 제공되는 자료의 주기성과 체계성으로 인해, 국가지하수관측망에서 생성된 자료와 정보들은 다양한 수문학적 연구에 활용되어 왔다(Moon and Woo, 2002; Moon et al., 2002; Cho and Park, 2008; Yoon et al., 2013, 2014). 또한 이들 관측자료는 국내의 지진에 의한 국내 지하수의 변동 현상에 대한 연구에 기반자료로서 활용되기도 하였다(Lee et al., 2011; Lee and Woo, 2012). 제주도의 경우, 지진 관련 지하수 변동 연구를 자체 관측정을 사용하여 co-seismic change를 분석한 결과가 보고된 바 있다(Ok et al., 2010; Lee et al., 2011).

이 연구는 우리나라에서 관측된 대규모와 중규모 지진에 의한 지하수 변동에 대한 기존 연구(Lee et al., 2011; Lee and Woo, 2012)에 추가하여, 규모 3.0 내외의 소규모 지진에 의해서도 지하수의 변동이 발생되고 관측가능한가라는 질문에 대해 답하고자 수행하였다. 이를 위하여 2012년 4월~6월 간에 국내에서 발생한 지진과 국가지하수관측망의 장기 지하수 관측자료에 나타난 이상변동을 비교·분석하였다.

연구 방법 및 자료

지하수위 관측자료의 변화를 일으키는 요인은 다음과 같이 Freeze and Cherry (1979)에 잘 제시되어 있다: (1) 강수에 의한 지하수의 함양, (2) 지하수 함양 중의 공기의 포화, (3) 식생의 증발산, (4) 하천변의 제방저류 효과, (5) 해안지역에서의 조석효과, (6) 대기압의 변화, (7) 피압 대수층에 대한 외압의 변화, (8) 지진의 영향, (9) 지하수의 양수, (10) 심부 대수층으로의 인위적 주입과 인공 함양, (11) 농업지역에서의 관개활동, (12) 사면 배수/터널 등의 지질공학작 공사. 이러한 변화 요인 중에서 (1)~(4), (11), (12) 등은 대체로 천부의 자유면 대수층 지하수에 주로 영향을 미친다. (5)~(6), (9)~(10) 요인들은 천부의 자유면 대수층과 심부의 피압 대수층 지하수에 모두 영향을 미칠 수 있으며, (7)~(8) 요인은 피압 대수층 지하수에만 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.

이 연구에서는 한국수자원공사 국가지하수정보센터에서 제공한 2012년도 국가지하수관측망의 관측자료를 대상으로, 지진과 지하수 관측자료의 변동 관계를 분석하였다. 국가지하수관측망의 관측소는 기본적으로 암반 관측공과 충적층 관측공의 쌍으로 구성되며, 지역적 여건에 따라서 암반 관측공만을 설치 운용하기도 한다. 지하수 관측자료를 활용한 관측공은 총 332개소의 관측공 중에서 2012년 4-6월 사이에 강수와 무관하게 이상변동이 발생한 관측공을 선별하고, 이들 중에서 관측심도가 20m로 동일한 관측공을 선별하였다. 그 결과, 기반암은 모두 결정질암으로서 지하수의 유동은 단열대를 통한 흐름을 보이는 김천지좌, 강진성진, 공주정안 관측소 등 3개 암반 관측공이 구분되었다 (Table 1).

이 연구에서는 특히 지진과의 연관성을 분석하기 위하여, 지하수위, 수온, 전기전도도의 관측자료는 심부에 설치된 암반 관측공 자료들을 대상으로 분석하였다. 이를 통해 전술한 지하수 변동요인 중에서 천부에서 발생할 수 있는 (2)~(4), (11)에 의한 효과를 무시할 수 있다. 지하수정보센터에서 제공하는 지하수위 관측자료는

1시간 단위의 자동계측 자료이며, 대기압의 영향에 대해 이미 보정이 완료된 자료이다. 따라서 (6) 대기압 영향에 의한 변동효과를 무시할 수 있다. 이들 외에 지하수 변동에 영향을 줄 수 있는 요인들에 대해서는 관측자료에서 수위/수질 변동양상으로부터 유추하였다. 예를 들면, (9)~(11)의 지하수 인위적 양수/주입과 회복에 의한 수위변동 양상은 Theis 특성곡선(Theis, 1935)의 형태와 비교하였으며, (12)의 인위적 공사배출에 의한 영향은 이 연구에서 분석대상으로 삼은 기간이 3개월임을 고려할 때, 그 영향이 분석기간보다 길게 나타날 것으로 가정하였다.

관측공의 유지관리와 주기적 시험 과정에서 발생하는 관측자료의 결측자료에 대해서는 자료의 관리를 담당하는 지하수관측센터 담당자에게 서면으로 확인하여 이상 변동에서 제외하였다. 나아가 이 연구에서 국가지하수관측망 자료를 사용함에 있어서, 원자료에 대해서는 자동 관측장비를 사용하여 주기적으로 유지관리를 하는 관측 자료이므로 자료의 신뢰성은 가정하였다. 나아가 관측자료의 변동이 관측장비와 센서의 민감도에 의한 것이 아님을 확인하기 위하여, 지진에 의한 변동으로 의심되는 지하수 관측자료들은 변동 이전기간의 변화(variation) 범위와 비교하여 분석하였다.

결과 및 토의

국의 지하수-지진 연구그룹에서는 대부분 특정한 단층대에서 발생하는 지진에 대하여 직접적 관측을 위하여 설치된 지하수 관측정을 통해, 지하수의 변화와 지진 발생기작 및 지진 에너지의 변화를 연계관측하며 그들 사이의 상관관계를 연구한다(King et al., 1999; Bakun et al., 2005; Ramana et al., 2007; Skelton et al., 2014). 단, 이러한 경우에도 해당 지하수 관측정에서 관측된 지하수의 변화가 의도하지 않은 다른 지역에서 발생한 지진에 의한 변화인지, 아니면 해당 지역에서 발생한 지진에 의한 변화인지는 온전히 지진 발생시기와 지하수 변동 시기를 대비하여 그 타당성을 확보하는 방법

Table 1. Site information of the selected groundwater monitoring stations.

Monitoring station	Latitude	Longitude	Elevation (m amsl*)	Bedrock	Monitoring depths (m bgs*)
Gimcheon-Jijwa	36.12°	128.15°	91.03	Granodiorite	20
Gangjin-Seongjeon	34.69°	126.71°	54.88	Gneissic granite	20
Gongju-Jeongan	36.54°	127.12°	34.41	Granitic gneiss	20

*"amsl" and "bgs" denote above mean sea level and below ground surface, respectively.

이 최선이다. 그러나 국내 국가지하수관측망의 지하수관측소는 원칙적으로 국가 지하수의 유동계를 대표하기 위하여 유역단위로 그 위치가 선정되었으며, 관측되는 요소와 관측구간 역시 지하수의 전반적인 수위와 배경수질을 관측하기 위하여 설정되었다. 이러한 이유로 국가 관측망 관측소에서 획득한 자료는 한 시간 간격으로 관측한 자료이며, 일반적으로 지진에 의한 실시간 변화를 감시하는 지진계와 같이 지진의 동시 감시(co-seismic monitoring)를 위한 목적으로는 적합하지 않다.

그럼에도 불구하고, 지하수의 상대적으로 느리고 안정적인 유동 및 수질변화 특성으로 인해, 지진과 같은 매질의 급격한 변화에 의한 영향은 시간 단위를 초과하여 일 단위, 월단위의 변화로도 확장되어 그 특성이 나타날 수 있다. 나아가 지진 발생 이전에 지질매체에 가해지는 스트레스의 변화는 수압의 변화를 초래하여 지하수위의 변동으로 나타날 수 있으며, 매질의 파괴로 인한 지진 발생 이전에 지질매체에 발생하는 미세균열 등이 지하수의 유동경로를 변경시키고 나아가 서로 다른 수질을 지니는 지하수의 혼합을 유발하게 되어 지하수질의 변동을 초래할 수도 있다. 이러한 지하수의 변화 특성은 지진 발생 이전(pre-seismic)과 이후(post-seismic)의 지하수 환경변화로 나타날 수 있다. 따라서 지진에 의한 변화를 감시하고 나아가 그 변화의 지속성을 규명하는 문제는, 지진 재해 지역에서의 상수원으로서의 수자원 확보 뿐 아니라, 지진 영향이 미치는 광범위한 지역에서 지하수를 수원으로 사용하는데 장기적으로 양적으로나 질적으로 영향을 미칠 수 있으며, 결과적으로 재

해 영향지역의 사회경제적 특성에 따라서는 상당히 중요한 의미를 지닐 수도 있다. 예를 들어 농업을 주 산업으로 하는 지역에서는 지진에 의한 심부 염지하수체가 상부의 담지하수체와 혼합하여 염분이 증가하는 경우에는 실질적으로 지하수를 이용한 농업용수의 확보와 사용에 심각한 사회경제적 문제가 야기될 수 있다.

국내의 지진사례

이 연구를 위해서 분석된 2012년 4월~6월 기간에 발생한 한반도 인근지역에서의 지진현상은 기상청(<http://www.kma.go.kr/weather/earthquake/domesticlist.jsp>)과 IRIS DB (Incorporated Research Institutions for Seismology, <http://ds.iris.edu/ieb/>)에 따르면 다음 표와 같다 (Table 2).

이 연구에서는 국내 발생 지진으로 최소 M2.5 이상의 지진(총 10 회)에 의한 영향을 분석하고자 하였으며, 원거리 발생지진에 의한 영향을 배제하지 않기 위하여 M7.0 이상의 국외 발생지진(총 3회)의 영향 가능성도 자료 분석에 포함하였다.

지하수 관측 자료에서의 이상 변동

일반적으로 점진적인 지하수의 유동과 그 수리화학적 특성의 변화를 가정하였을 때, 지하수위, 수온 및 전기전도도 관측 자료에서 상대적으로 급하게 나타나는 변동들을 비정상적인 변동으로 선별하였다. 지하수 관측 자료의 변동에서 이상적 변동(abnormal changes)으로 판단한 근거는, 결측없이 연속적으로 자동 관측된 자료들

Table 2. Earthquakes (> M2.5) that occurred in and near the Korean Peninsula and in the far-field (> M7.0) during April-June 2012.

	Time (Seoul)	Magnitude	Latitude (°)	Longitude (°)	Location of epicenter
Korea inland	2012-06-23 16:42	2.6	36.70	128.31	NE 17 km, Mungyeong-si, Gyeongbuk
	2012-06-19 20:55	3.1	33.48	125.93	NW 30 km Offshore, Kosan, Jeju-si
	2012-06-01 12:05	2.6	37.12	125.96	WSW 20 km Offshore, Ongjin-gun, Incheon
	2012-05-30 2:48	3.1	36.57	129.57	NE 25 km Offshore, Yeongdeok-gun, Gyeongbuk
	2012-05-16 17:50	2.7	36.23	128.49	W 8 km, Gunwi-gun, Gyeongbuk
	2012-05-15 11:05	2.9	35.92	129.62	ESE 25 km Offshore, Pohang-si, Gyeongbuk
	2012-05-11 12:46	3.9	36.02	127.71	ENE 5 km, Muju-gun, Jeonbuk
	2012-05-02 1:33	3.4	33.69	126.04	NNW 46km, Offshore, Kosan, Jeju-si
	2012-04-20 21:11	3.1	33.43	127.26	E 36 km Offshore, Sungsan, Seogwipo-si
Over seas	2012-04-17 13:31	2.6	35.72	126.51	W 20 km Offshore, Buan-gun, Jeonbuk
	2012-04-12 16:15	7.0	28.696	-113.104	BAJA California, Mexico
	2012-04-11 19:43	8.2	0.802	92.463	Off west coast of northern Sumatra
	2012-04-11 17:38	8.6	2.327	93.063	Off west coast of northern Sumatra

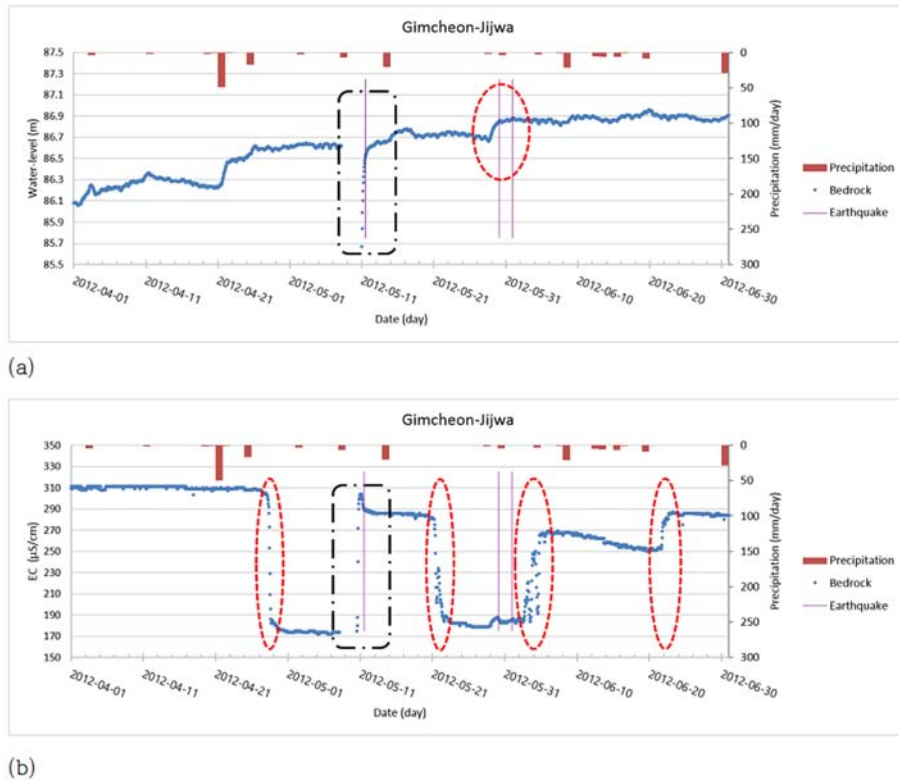


Fig. 1. Monitoring data from Gimcheon-Jijwa station during April-June 2012: (a) water-level, (b) electrical conductivity. (Dotted circles and quadrangle indicate abnormal changes and the impact of maintenance, respectively).

중에서, 자연적인 일변동(daily variation)을 기준으로 이 보다 크게 나타나는 변화를 우선 분석대상으로 선별하였다. 위 기간에 획득한 지하수 관측 자료에서 이상변동을 보이는 관측정은 대표적으로 김천지좌, 강진성진, 공주정안 등이다. 이들 외에도 다수의 관측정에서 지하수의 변동이 관측되었으나, 이들 변동과 지진의 관계를 대표적으로 설명하기 위하여 전술한 3개 관측소에서의 변화를 세부적으로 설명하고자 한다.

김천지좌 관측소

이 관측공에서 보이는 5월 8일부터 10일까지 2.4일간의 수위 및 전기전도도의 급격한 변화는 관측정의 유지관리와 현장 시험에 따른 변화로 확인되었다. 그러나 Fig. 1에 보이는 바와 같이, 이 기간을 제외한 나머지 기간에서 지하수위는 연속적으로 ± 0.03 m/day의 일변동을 보이며 유지된다. 그러나 5월 28일부터 30일 사이에 일변동의 7배 정도인 0.22 m 수위상승이 발생하였다. 5월 28일에 1.5 mm의 강수가 있었으나, 5월 2일과 6월

4일에 3 mm/day의 강수에도 지하수위의 상승이 관측되지 않을 것으로 보아, 5월 28일의 지하수위 상승은 강수와는 무관한 현상으로 판단된다. 따라서 이러한 현상이 발생한 근접 시점에서의 지진 현상(5월 30일 M3.1 경북 영덕; Table 2)과 연계시킨다면, 이 시기의 지하수위 상승은 지진 발생과정에서 나타나는 수압의 증가현상으로 보여진다.

지하수의 전기전도도의 경우, 평균 일변동량은 ± 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이지만, 4월 28일 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 급락, 5월 21일 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 급락, 6월 1일부터 시작하여 4일까지 지속된 78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 급등과 6월 21일 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 급상승 등 총 4회 급격한 증감을 보여준다. 지하수 관측 자료에서 지하수위의 변화는 관측지점에서 발생하는 직접적인 지하수의 유입과 유출을 보여주지만, 동일한 수질특성을 지니는 지하수가 일정한 유속으로 서서히 유동하는 시스템에서는 지하수위의 급격한 변화는 예상되지 않는다. 그러나 지하수의 유동경로 상에 존재하는 오염원의 영향이나 강수의 유입 또는 지진과 같은 지하수의 유동경로

를 변화시킬 수 있는 현상으로 인해 서로 다른 수질특성을 지니는 지하수체(water mass)가 혼합되는 경우에는 연속적 지하수 흐름계에서도 수질의 변화가 나타날 수 있다. 따라서 4월 28일에 발생한 EC의 급락은 4월 21일과 25일에 발생한 강수의 함양으로 인해 나타날 수도

있다. 이는 강수에 포함된 용존이온 함량이 지하수 중의 용존이온 함량에 비하여 상대적으로 낮은 값을 지니기 때문에, 지하수 중 용존이온 농도의 희석효과가 용존이온 함량을 지시하는 인자인 EC 값의 변화에서 나타난 것으로 보인다. 5월 21일의 EC 급락현상도 마찬가지로

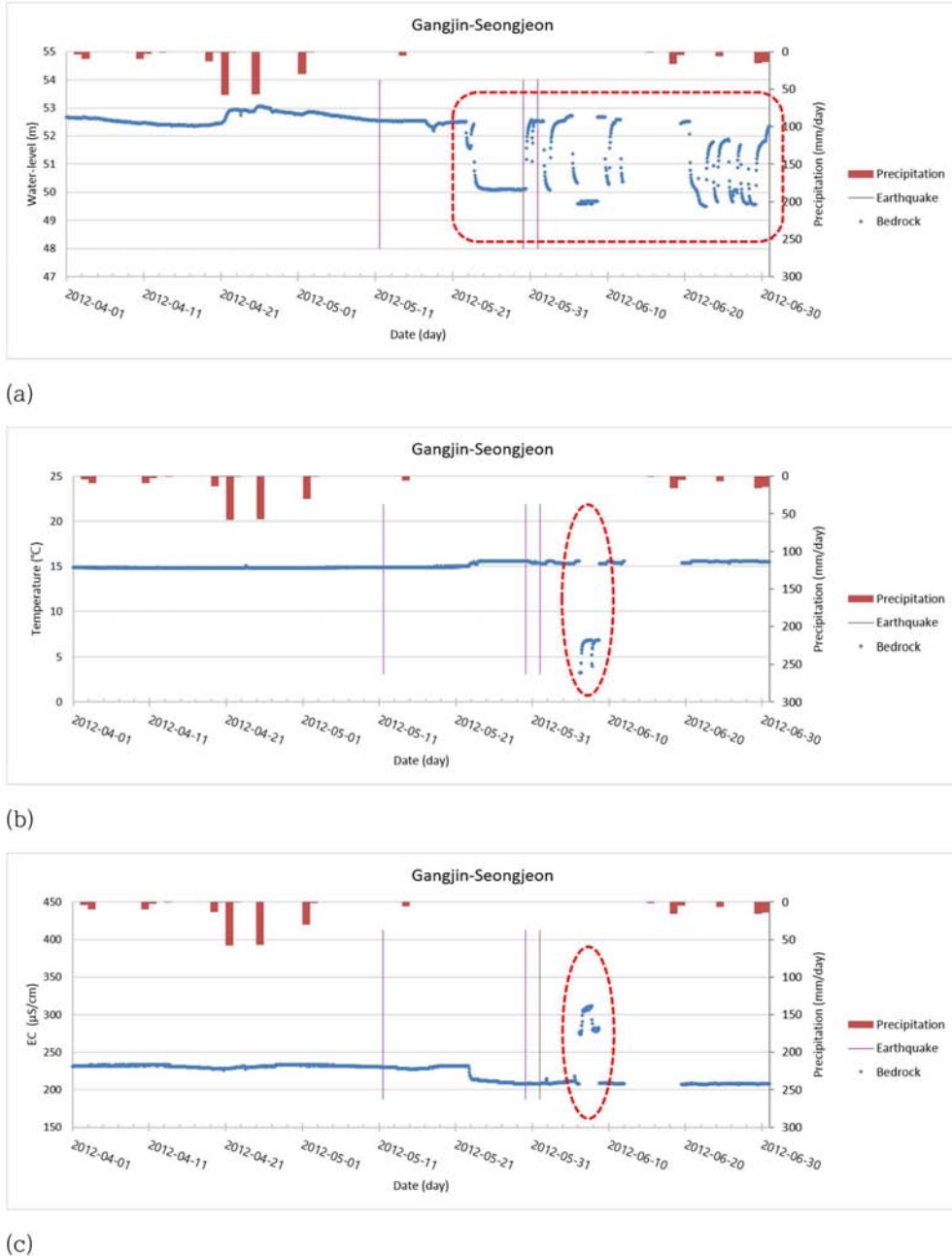


Fig. 2. Monitoring data from Gangjin-Seongjeon station during April-June 2012: (a) water-level, (b) temperature, (c) electrical conductivity. (Dotted circle indicates the abnormal change).

5월 14일 강우함양으로도 설명이 가능하며, 이들 경우에는 지하수위의 변동은 강수시기에 근접하여 발생하지만, 용존이온 함량이 적어서 EC 값이 낮은 강수기원의 함양된 수체는 심부 관측지점까지 이동하여 EC 값이 높은 지하수체와 혼합되는데 일정한 시간이 지연되게 된다. 이러한 강수기원 함양수체가 지하수 관측심도에까지 이동하는데 소요되는 지연시간은 대수층 내 지하수의 수직적 수리경사도와 수리전도도, 유동경로의 연결성과 관측지점의 심도 등에 좌우된다.

그러나, 특히 6월 2일부터 4일 사이의 EC 값이 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 급상승하는 현상은, 앞선 현상과는 달리 오히려 용존이온이 함량이 상대적으로 높아서 EC 값이 높게 나타나는 수체의 혼입으로 발생한 것을 의미한다. 변동규모에 차이는 있으나, 동일한 현상이 6월 21일에도 발생하였으며, 이때에는 약 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이 상승하였다. 이러한 지하수체의 EC 값의 급격한 상승현상은 특정 시점에 갑자기 용존이온 함량이 높은 지하수가 관측공의 관측심도로 주입되었을 가능성 외에는, 지진과 같은 에너지파의 전달 과정에서 순간적으로 지하수 유동경로의 열림과 닫힘 현상에 의해 심부 지하수가 유입되어 혼합된 것으로 해석할 수 있을 것이다.

결과적으로 5월 28일부터 6월 4일까지의 지하수위와 EC의 변동은 5월 30일 경북 영덕에서 발생한 지진의 영향으로 지진 발생 전의 압력 증가로 인한 수위상승과 지진 후 대수층 매질의 지하수유동경로의 변동과 심부 지하수의 유입에 따른 상승된 수위의 유지와 EC의 상승현상으로 해석된다.

강진성진 관측소

강진성진 관측소의 자동관측 자료는 2012년 6월 11일~19일 기간에 결측되었으므로 그 이후 기간에 대해서는 자료의 신뢰성 문제로 분석을 수행하지 않았으며, 이 연구에서는 자료가 연속적으로 수집된 그 이전 기간에 대하여만 분석하였다.

이 관측소에서 지하수위의 급변동은 5월 22일에 약 2.5 m의 수위하강이 발생하는 것으로 시작되며, 이렇게 낮아진 수위는 약 일주일 후인 5월 30일 원수위로 회복된다(Fig. 2). 또한 지하수위 변동양태가 5월 11일 이전의 일평균 변동량 $\pm 0.2 \text{ m}/\text{day}$ 의 점진적, 안정적 변화에서 5월 30일 이후에는 일변동량이 $\pm 2.5 \text{ m}/\text{day}$ 로 급격하게 증대되고, 이러한 변동이 지속되는 모습을 보인다. 같은 기간에 국립해양조사원(<http://www.khoa.go.kr>)에서 측정된 목포지역 조위의 변화는 최소 $\pm 1.0 \text{ m}/\text{day}$ 에서

최대 $\pm 3.0 \text{ m}/\text{day}$ 까지 변화를 보인다. 따라서 이러한 지하수위 일변동량의 급격한 변화와 변동량 및 변동양상의 지속성은 관측공으로 연결되는 지하수의 유동경로가 변경되었음을 의미한다.

관측지점 6월 6~8일 사이에는 지하수위의 하강과 더불어 수온의 하강-회복이 9°C 정도 발생하였으며, 동일한 시기에 EC 값의 변동은 이전 시기의 평균 일변동량 $\pm 5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 의 20배에 달하는 약 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 가 상승-회복하였다. 이 시점의 지하수위, 수온, EC 값의 변동은 다른 시기와 비교하여 볼 때 이상변동으로써, 수온과 EC가 다른 지하수체의 혼입에 의한 결과로 해석된다. 하지만 이러한 현상이 단기적으로 제한되어 나타나고, 반복적이지 않거나 지속적이지 않아서 인위적 지하수의 양수로 인한 지하수의 유동 결과로 해석하기는 어렵다.

따라서 이 관측점에서 나타난 지하수 변화에서는 5월 22일의 수위 급락과 5월 30일의 수위 급상승에 의한 회복, 그리고 그 이후에 지속되는 변동의 이상, 6월 6~8일 사이의 수위, 수온, EC 값의 동시 변화 등이 이상변동으로 판단된다. 이 시기에 발생한 국내 지진으로는 경북 영덕군 북동쪽 25 km 해역에서 5월 30일에 규모 3.1 지진 발생의 기록이 있다. 따라서 5월 30일 이후의 지하수계의 지속적 변동의 원인으로 이 지진에 의한 지하수 유동경로와 유동계의 변동가능성을 유추할 수 있다.

공주정안 관측소

이 관측소에서는 자료 분석기간 중 4월 30일(2시간), 5월 3일(12시간), 5월 16일(2시간) 등 3회의 결측이 발생하였다. 따라서 자료 분석에서는 결측된 구간을 포함하지 않는 기간 동안의 이상적 변동을 조사하였다.

공주정안 관측소의 자료에서는 5월 25일부터 시작된 지하수위와 EC 값의 이상변동이 명확히 드러난다(Fig. 3). 지하수위는 이전 시기의 평균 30.3 m와 일변동률 $\pm 0.02 \text{ m}/\text{day}$ 를 유지하다가, 25일에 갑자기 60 cm 상승하여 30.9 m를 기록하였고, 이후 5월 29일에 20 cm 급락을 시작하여 6월 27일 경에는 원수위로 회복되는 현상을 보인다. 이와 같은 변동은 지하수의 EC 자료에서도 유사하게 관측된다. EC 값 역시 5월 25일에 급등하여 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 약 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 증가한다. 이전 기간의 일변동량이 $\pm 5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 임을 고려한다면, 이 변동은 외부적인 요인에 의한 이상변동으로 고려할 수밖에 없다. 수위변동과 마찬가지로, EC 값 역시 6월 27일 경에 원상회복되는 것을 볼 수 있다.

이 관측소의 지하수위 변화와 강수현상과의 관계를

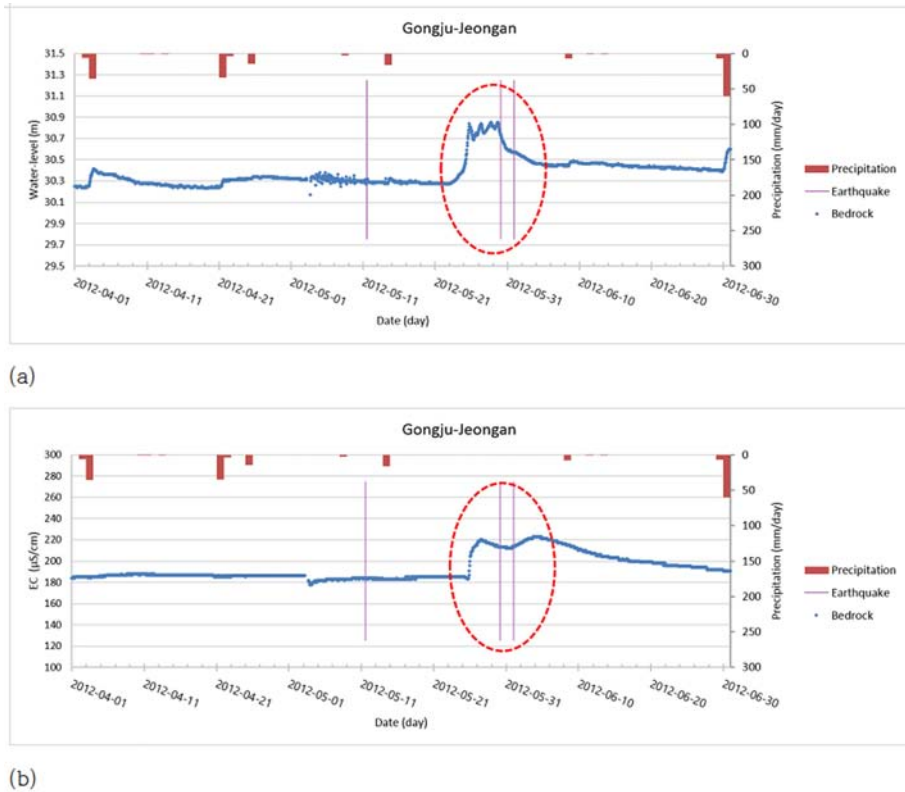


Fig. 3. Monitoring data from Gongju-Jeongan station during April-June 2012: (a) water-level, (b) temperature. (Dotted circle indicates the abnormal change).

보면, 4월 3일 36 mm/day와 4월 21일 34.5 mm/day의 강수에 의한 수위변화는 각각 15 cm, 10 cm 규모로 당일 발생하였다. 따라서 5월 25일~6월 2일 사이의 60 cm 크기로 급상승-하강하는 수위변동은 강수에 의한 영향으로 볼 수 없다. 지하수의 수위변동은 강수에 의한 영향으로 볼 수 없다. 지하수의 EC 값 역시 이전의 강수현상에서도 전혀 변화가 없었는데, 5월 25일부터 급작스러운 변동이 발생하였다. 따라서 이러한 수위와 EC 값의 변화를 일으킬 수 있는 요인을 찾는다면, 지진발생과 같은 지질매체에 대한 스트레스의 축적과정과 이 기간 동안의 수압증가, 지진 발생 이후 수압의 해소에 따른 원상 복구로 이어지는 일련의 과정으로 설명할 수 있다.

이 기간 동안에 발생한 국내 지진은 5월 30일 경북 영덕군 북동쪽 25 km 해역에서 발생한 M3.1 지진과 6월 1일 인천 옹진군 덕적도 서남서쪽 20 km 해역에서 발생한 M2.6 지진을 들 수 있다. 그리고 지하수의 수위와 EC 값의 급작스러운 변동이 지진에 의한 것이라면, 5월 26일부터 발생하는 이상적 변화는 지진의 전조현상으로 해석될 수 있다.

지진 영향범위와 지하수 변동

지진에 의해 발생하는 지하수의 변동을, 지진의 에너지가 확산되는 지역적 영향범위라는 개념으로 이해하여, 지진의 영향이 도달할 수 있는 지역을 정량적으로 평가하기 위한 방법들이 연구된 바 있다. 대표적으로 Dobrovolsky et al. (1979)은 지표면에서 균질등방 매체를 가정하였을 때 암반의 전조현상으로서의 변형 (precursor deformation)이 발생할 수 있는 범위를 평가하기 위하여, 예상되는 지진의 규모와 진앙으로부터의 영향반경을 “strain radius (ρ)”라고 부르며, 다음 식을 제시하였다:

$$\rho = 10^{0.43 M} \text{ km}$$

여기서 M 은 지진의 규모(magnitude)를 나타낸다. 이 식에 따르면, 규모 3.0 지진의 경우, 전조 변형이 발생할 수 있는 영향반경은 19.5 km 이며, 규모 7.0인 경우에는 전조현상을 기대할 수 있는 반경은 약 1,023 km 정도가 된다. 즉, 진앙에서 반경 1000 km 내외의 지역에서는

Table 3. Radius of influence of earthquake events during April-June 2012 and distances to the groundwater monitoring stations.

Magnitude	> M2.5 (Korea inland)										> M7.0 (Overseas)		
	2.6	3.1	3.4	3.9	2.9	2.7	3.1	2.6	3.1	2.6	8.6	8.2	7
Earthquake event	Apr 17	Apr 20	May 2	May 11	May 15	May 16	May 30	Jun 1	Jun 19	Jun 23	Apr 11	Apr 11	Apr 12
Gimcheon Jijwa	154	309	331	41	135	33	137	225	356	66	5,193	5,366	10,401
Gangjin Seongjeon	116	149	127	173	298	235	333	278	152	266	4,993	5,165	10,603
Gongju Jeongan	106	345	331	78	235	128	220	122	356	108	5,150	5,324	10,442
Radius of influence 1* (km)	13	22	29	48	18	14	22	13	22	13	4,989	3,357	1,023
Radius of influence 2* (km)	15	26	36	62	21	16	26	15	26	15	11,169	7,178	1,905

* Radius of influence 1 and 2 were calculated using the methods proposed by Dobrovolsky et al. (1979) and Wang and Manga (2012), respectively.

M7.0 규모의 지진이 발생하기 전에 한반에서 전조현상으로서의 변형을 발견할 수 있다고 해석할 수 있다.

이와 유사하지만 지하수에 보다 직접적으로 연관된 접근방식으로, Wang and Manga (2010)는 지진에 의해 유도되는 수문학적 변화들을 지진파에 수반되는 동력학적 반응(dynamic responses)으로 설명하였고, 이를 위해 지진파 에너지 밀도(seismic energy density; e)를 계산하여 서로 다른 수문학적 변화들을 비교하여 다음의 관계식을 제시하였다:

$$\log r = 0.48 M - 0.33 \log e - 1.4$$

여기서 r 은 진앙으로부터의 거리, M 은 지진의 규모, e 는 지진파 에너지 밀도이다. 그리고 500개 이상의 지진과 그에 대한 지하수의 변동기록들에 대하여 진앙과 규모, 관측거리를 조사한 자료를 도시하였다. 이 연구에서 대부분의 지하수의 변동은 $e \approx 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 이 한계이며, 균열 확장압과 같은 지진 변동에 민감한 암반에서는 $e \approx 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 이 한계임을 제시하였다. 따라서 위의 식에 의하면, 규모 3.0의 지진은 민감한 균열 암반의 경우에서도 그 에너지 확산에 의해 지하수에 변동을 줄 수 있는 한계영역은 약 23 km이고, 규모 7.0의 경우에는 약 1,905 km에 이른다.

이와 같은 지진의 영향범위에 대한 정량적 평가방법을 적용하여, 이 분석기간에 국내에서 발생한 M2.5 이

상의 지진과 국외의 M7.0 이상의 지진에 대한 진앙과 관측소간의 거리를 기준으로 각 지진의 영향범위 내에 포함되는지 여부를 평가한 결과는 다음 Table 3과 같다.

앞에 제시된 두 가지 Dobrovolsky et al. (1979)과 Wang and Manga (2012) 방법에 근거한 영향범위 내에 포함되는 현상은 5월 11일 전북 무주군 동북동쪽 5 km 지점에서 발생한 M3.9의 지진에 대하여 김천지좌 관측소에서 지하수에 전조 내지 지진의 영향이 나타날 수 있을 것으로 예상되었다. 그러나 안타깝게도 이 관측소에서는 5월 8일부터 10일까지 지하수 관측장비의 유지보수와 양수시험 등을 수행하는 과정에서 관측자료의 결측이 발생하였다. 따라서 실질적으로 5월 11일 무주 지진에 대해서는 유일하게 전조 관측이 가능하다고 예상되는 범위 내에 속하는 관측지점이었으나, 실질적으로 지진의 영향을 관측할 수 있었는가에 대한 여부는 판단할 수 없었다. 이외의 다른 M2.5 이상의 국내 지진에 대해서는 3개 관측소 모두가 거리상으로 영향범위를 초과하고 있다. 따라서 지금까지 제시된 이론적 배경으로는 지하수에서 지진의 영향이 관측되지 않을 것으로 예상된다.

국외에서 발생한 대규모 지진에 의한 국내 지하수 관측자료에서의 이상변동은 Ok et al. (2010), Lee et al. (2011), Lee and Woo (2012) 등에 의하여 보고된 바 있다. 따라서 이 연구의 분석기간 중 발생한 M7.0 이상

Table 4. Comparison of normal daily variation with abrupt changes in water-level and electrical conductivity of groundwater at the monitoring stations.

Monitoring station	Water-level		Electric conductivity		Distance ²
	Normal daily variation	Abrupt change ¹	Normal daily variation	Abrupt change	
Gimcheon-Jijwa	± 0.03 m/day	0.22 m	± 5 µS/cm	80 µS/cm	137 km
Gangjin-Seongjeon	± 0.2 m/day	2.5 m			333 km
Gongju-Jeongan	± 0.02 m/day	0.6 m	± 5 µS/cm	40 µS/cm	220 km

¹indicates variations resulting from the earthquake that occurred in the Yeongdeok area on May 30th.

²denotes the distance from each monitoring station to the epicenter of the Yeongdeok earthquake.

의 대규모 지진을 IRIS database (<http://www.iris.edu/hq/>)에서 확인한 결과, 수마트라 북부 지역과 멕시코에서 총 3회 확인되었다(Table 2). 이들 지진의 규모와 진앙의 좌표를 이용하여 국내 지하수 관측공까지의 거리를 환산한 결과, 4월 11일에 발생한 M8.2, M8.6 수마트라 북부의 지진에 대해서는 국내 모든 지하수 관측지점에 그 영향을 관측할 수 있는 범위에 포함된다. 그러나 멕시코에서 발생한 M7.0 지진의 영향에서는, 계산식을 근거로 할 때, 영향범위에서 벗어나 있다. 따라서 수마트라 지역에서 발생한 지진에 대해서는 국내 지하수 관측 자료에서 그 영향을 볼 수도 있겠지만, 이 연구에서 분석한 결과에서는 이상변화를 확인할 수 없었다.

전술한 3개 국가지하수관측소의 암반 관측정에서 관측된 이상적 변화로 판단되는 관측 자료의 변화는 강수현상과 무관하게 변동하며 일변동의 수 배에서 수 십 배에 달하는 규모의 수위변화와 EC 값의 변화로 표현된다. 이들 수위와 EC 값의 변동은 동시에 관측되기도 하며(예: 강진성전, 공주정안 관측소), 경우에 따라서는 단독적 변화로 나타나기도 한다(예: 김천지좌 관측소). 또한 이들 변화가 다른 이유로는 합리적으로 해석이 안되기 때문에 이 시기에 국내에서 발생한 지진과 연관이 있다고 가정한다면, 이러한 지진의 전조 현상으로 볼 수 있는 변화(예: 공주정안 관측소)도 확인할 수 있다.

이들 3개 관측소에서 확인된 지하수의 이상변동은 모두 5월 30일 경북 영덕에서 발생한 M3.1 지진과 연관성을 보인다. 그러나 각 관측소의 위치와 진앙까지의 거리 및 변동의 규모는 선형관계를 보이지 않는다(Table 4).

결론 및 제언

이 연구에서는 국내에서 운용되고 있는 지하수 장기 관측망의 자동 관측자료를 이용하여, 발생빈도가 상대적으로 높은 M3.0 내외의 소규모 지진에 의한 영향과 지

진 전조현상에 의한 지하수의 변화를 관측하고 구분할 수 있는지 확인하고자 하였다.

분석된 3개 지하수 관측소에서의 이상변동과 원인으로 유추되는 지진과의 관계는 다음과 같이 요약할 수 있다:

(1) 김천지좌 - 5월 28일부터 6월 4일까지의 지하수 위와 EC의 변동은 5월 30일 경북 영덕에서 발생한 M3.1 지진의 영향으로 지진 발생 전의 압력 증가로 인한 수위상승과 지진 후 대수층 매질의 지하수유동경로의 변동과 심부 지하수의 유입에 따른 상승된 수위의 유지와 EC의 상승현상으로 해석된다.

(2) 강진성전 - 5월 22일의 수위 급락과 5월 30일의 수위 급상승에 의한 회복, 그리고 그 이후에 지속되는 변동의 이상, 6월 6~8일 사이의 수위, 수온, EC 값의 동시 변화 등이 이상 변동으로 판단된다. 이러한 변동은 경북 영덕군에서 5월 30일 M3.1 지진이 원인으로 해석되며, 5월 30일 이후의 지하수계의 지속적 변동은 이 지진에 의한 지하수 유동경로와 유동계의 변동가능성으로 해석된다.

(3) 공주정안 - 5월 25일~6월 2일 사이의 급상승-하강하는 수위변동과 EC 값의 변화는 지진발생과 같은 지질매체에 대한 스트레스의 축적과정과 이 기간 동안의 수압증가, 지진 발생 이후 수압의 해소에 따른 원상 복구로 이어지는 일련의 과정으로 설명할 수 있다. 경북 영덕군의 5월 30일 M3.1 지진이 원인으로 추정되며, 5월 26일부터 발생하는 이상적 변화는 지진의 전조현상으로 해석될 수 있다.

현재의 자료만으로 지하수 관측 자료에서 나타나는 이상변동이 전술한 바와 같이 특정한 지진에 의한 영향임을 명시하는 것은 불가능하다. 이는 지진의 발생 기작이 비선형적이고(Geller, 1997), 특정 위치에서의 지진에 의한 암반 내 지하수의 물리적, 화학적 반응을 진앙과 관측지점간의 공간적 변화를 고려할 때 1:1 대응으로 표

현할 수 없기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 이러한 지하수의 이상변동이 지진 외에는 합리적인 다른 원인을 제시할 수 없기 때문에, 지진에 의한 발생 가설이 과학적으로 의미 있다고 할 수 있다.

이 연구에서 제시한 바와 같이, 3개 관측소에서 추출된 지하수의 이상 변동은 국내에서 발생하는 M3.0 내외의 소규모 지진에 의해서도 그 영향이 지하수에서 관측될 수 있음을 보여준다. 특히 이 연구에서 활용한 관측공 자체의 구조가 지진관측을 목적으로 하지 않고, 상대적으로 지하수 유입구간(screen)의 길이가 긴 배경수질 관측공이었다. 따라서 만약 관측공의 지하수 유입구간을 지진감시 목적으로 축소한다면, 지하수에서 관측할 수 있는 지진 에너지는 증폭될 수 있을 것이며, 결과적으로 지진 영향을 더욱 잘 관측할 수 있을 것으로 기대된다.

국내 지하수관측공에서 관측된 지하수의 이상 변동 자료는, 지진과 연관되어 있을 가능성을 국내발생 및 국외발생 지진과의 시기적 연관성으로 보여줄 수는 있다. 이 연구에서 분석된 자료들은 모두가 5월 30일 영덕지역에서 발생한 지진에 대해 공통적으로 반응한 것으로 보인다. 그러나 이들의 반응정도는 진앙과의 거리와 비선형적으로 나타난다. 또한 동일 지점에서 발생하는 반복적인 지진이 동일한 관측소에서 관측되리라는 보장도 역시 할 수 없다. 이는 지진의 영향이 지하수에 미치는 순간, 지하수의 유동경로의 변경과 이로 인한 서로 다른 수질을 보이는 수체의 혼합 등으로 인해 새로운 지하수계가 만들어 질 수 있기 때문이다. 지진과 에너지가 관측지점을 통과하여 지질매체가 원상회복된다고 하더라도, 이 과정에서 발생할 수 있는 유동경로의 변화가능성은 여전히 남아있을 수 있다. 따라서 이러한 부분에 대한 의문이 해결되기 위해서는, 동일한 지점에서 발생하는 복수의 지진현상에 대해서 동일한 관측정에서 반복적으로 관측이 수행되어 입증해야 하는 한계가 남아있다.

산업발전과 더불어 갈수록 심화 확대되는 지하공간의 개발, 원자력에너지를 사용함으로 부수적으로 발생하는 방사성폐기물의 지하처분 등 시간이 갈수록 국내에서는 지하공간의 안전성 확보에 더 많은 노력과 투자를 기울여야 할 것이다. 특히 국민들의 생활 및 산업과 직접적으로 관련하여 기후변화의 시대에 적응하기 위한 적절한 수자원원의 확보 필요성이 날로 증대되고 있다. 지하수 관측을 지하공간의 안전성 확보의 지표로 개발하고 사용하는 기술의 개발과 연구가 갈수록 중요해지는 이유이기도 하다.

사 사

본 연구는 기상기술개발원의 재원으로 기상기후지진 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었기에 감사드립니다(과제번호 : CATER 2012-8169). 또한 연구수행에 필요한 자료를 지속적으로 제공해주신 국가지하수정보센터(GIMS)에 감사드립니다.

References

- Bakun, W. H., Aagaard, B., Dost, B., Ellsworth, W. L., Hardebeck, J. L., Harris, R. A., Ji C., Johnston, M. J. S., Langbein, J., Lienkaemper, J. J., Michael, A. J., Murray, J. R., Nadeau, R. M., Reasenber, P. A., Reichle, M. S., Roeloffs, E. A., Shakal, A., Simpson, R. W., and Waldhauser, F., 2005, Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield Earthquake, *Nature*, 437, 969-974.
- Brodsky, E. E., Roeloffs, E., Woodcock, D., Gall, I., and Manga, M., 2003, A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 108(B8), 2390.
- Chadha, R. k., Chandrani Singh, and Shekar, M., 2008, Transient changes in well water level in bore wells in western India due to 2004 M_s9.3 Sumatra Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(5), 2553-2558.
- Che, Y. T. and Yu, J. Z., 1992, Preliminary approach to quality-evaluation method of seismo-groundwater observation wells, *Earthquake (Beijing)*, 01, 59-64.
- Che, Y. T., Gu, Y. Z., Yu, J. Z., and Liu, W. Z., 2002, Remote anomalies of subsurface fluid before the M_s8.1 earthquake in west of Kunlun Mountain mouth and their significance, *Earthquake (Beijing)*, 22(04), 106-113.
- Che, Y. T., Yu, J. Z., Zhang, D. W., Liang, H. F., and Tang, Y., 1994, On the plan for increasing the capacity to reflect seismicity of the precursor observation network in the capital area, *Earthquake (Beijing)*, 01, 1-10.
- Chia, Y., Wang, Y. S., Chiu, J. J., and Liu, C. W., 2001, Changes of groundwater level due to the 1999 Chi-Chi Earthquake in the Choshui River alluvial fan in Taiwan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 1062-1068.
- Cho, J. W. and Park, E., 2008, A study on delineation of groundwater recharge rate using water-table fluctuation and unsaturated zone soil water content model, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 13(1), 67-76 (in Korean with English abstract)
- Dobrovolsky, I. P., Zubkov, S. I., and Miachkin, V. I., 1979, Estimation of the size of earthquake preparation zone, *Pure and Applied Geophysics*, 117(5), 1025-1044.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979, *Ground Water*, Prentice Hall, 604p.
- Geller, R. J., 1997, *Earthquake prediction: a critical*

- review, *Geophysical Journal International*, 131(3), 425-450.
- National Groundwater Information Management and Service Center (GIMS), Groundwater monitoring network, Retrieved from <http://www.gims.go.kr/monitor3/index.aspx>.
- Huang, F. Q., Jian, C. L., Tang, Y., Xu, G. M., Deng, Z. H., and Chi, G. C., 2004, Response changes of some wells in the mainland subsurface fluid monitoring network of China, due to the September 21, 1999, M_s 7.6 Chi-Chi Earthquake, *Tectonophysics*, 390(1-4), 217-234.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, K., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., and Sano, Y., 1995, Groundwater radon anomaly before the Kobe Earthquake in Japan, *Science*, 269(5220), 60-61.
- Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS), <http://www.iris.edu/hq/>.
- Ingebristen, S. E. and Manga, M., 2014, Earthquakes: Hydrogeochemical precursors, *Nature Geoscience*, 07, 697-698.
- Itaba, S., Koizumi, N., Toyoshima, T., Kaneko, M., Sekiya, K., Ozawa, K., 2008, Groundwater changes associated with the 2004 Niigata-Chuetsu and 2007 Chuetsu-oki Earthquakes, *Earth Planets Space*, 60, 1161-1168.
- Kim, G. B., Yi, M. J., Kim, J. W., Lee, J. Y., and Lee, K. K., 2004, Evaluation of estimating groundwater recharge using water-level data obtained from the National Groundwater Monitoring Stations, *The Journal of Engineering Geology*, 14(3), 313-323 (in Korean).
- King, C. Y., Azuma, S., Igarashi, G., Ohno, M., Saito, H., and Wakita, H., 1999, Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan, *Journal of Geophysical Research*, 104(B6), 13073-13082.
- King, C. Y., Azuma, S., Ohno, M., Asai, Y., He, P., Kitagawa, Y., Igarashi, G., and Wakita, H., 2000, In search of earthquake precursors in the water-level data of 16 closely clustered wells at Tono, Japan, *Geophysical Journal International*, 143(2), 469-477.
- Kitagawa, Y., Koizumi, N., and Tsukuda, T., 1996, Comparison of postseismic groundwater temperature changes with earthquake-induced volumetric strain release, Yudani hot spring, Japan, *Geophysical Research Letter*, 23(22), 3147-3150.
- Lee, H. A. and Woo, N. C., 2012, Influence of the M9.0 Tohoku Earthquake on groundwater in Korea, *Geosciences Journal*, 16(1), 1-6.
- Lee, H. A., Kim, M. H., Hong, T. K., and Woo, N. C., 2011, Earthquake observation through groundwater monitoring: A case of M4.9 Odaesan Earthquake, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16(3), 38-47 (in Korean with English abstract).
- Lee, S. H., Hamm, S. Y., Ha, K., Kim, Y. C., Cheong, B. K., Ko, K. S., Koh, 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 and Groundwater Environment*, 16(2), 41-51 (in Korean with English abstract).
- Liu, C., Wang, G., Zhang, W., and Mei, J., 2009, Coseismic responses of groundwater levels in the three gorges well-network to the Wenchuan M_s 8.0 Earthquake, *Earthquake Science*, 22(2), 143-148.
- Ma, J. Y., Liu, X. L., and Li, J. Y., 2008, Anomaly characteristics of subsurface fluid in Tianjin region before Wen'an Earthquake with M_s 5.1, *Earthquake (Beijing)*, 28(1), 73-78.
- Moon, S. K. and Woo, N. C., 2002, Contribution of hydrogeological factors to groundwater recharge ratio, *Economic and Environmental Geology*, 35(5), 479-490 (in Korean with English abstract).
- Moon, S. K., Woo, N. C., and Lee, K. S., 2002, A study on the relation between types and recharges of groundwater: Analysis on national groundwater monitoring network, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 7(3), 45-59 (in Korean with English abstract).
- Ohno, M., Sato, T., Notsu, K., Wakita, H., and Ozawa, K., 1999, Groundwater-level changes in response to bursts of seismic activity off the Izu Peninsula, Japan, *Geophysical Research Letters*, 26(16), 2501-2504.
- Ohno, M., Sato, T., Notsu, K., Wakita, H., and Ozawa, K., 2006, Groundwater-level changes due to pressure gradient induced by nearby earthquakes off Izu Peninsula, 1997, *Pure and Applied Geophysics*, 163(4), 647-655.
- 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(3), 359-369 (in Korean with English abstract).
- Park, J. K., Kim, R. H., Lee, J. Y., Choi, D. H., and Kim, T. D., 2007, Evaluation of status of groundwater quality Monitoring Network of Korea: Implications for improvement, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12(6), 92-99 (in Korean with English abstract).
- Ramana, D. V., Chadha, R. K., Singh, C., and Shekar, M., 2007, Water level fluctuations due to earthquakes in Koyna-Warna region, India, *Natural Hazards*, 40(3), 585-592.
- Singh, V. S., 2008, Impact of the earthquake and tsunami of december 26, 2004, on the groundwater regime at Neill Island (south Andaman), *Journal of Environmental Management*, 89(1), 58-62.
- Skelton, A., Andren, M., Kristmannsdottir, H., Stockmann, G., Morth, C., Sveinbjornsdottir, A., Jonsson, S., Sturkell, E., Guorunardottir, H., Hjartarson, H., Siegmund, H., and Kockum, I., 2014, Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland, *Nature Geosciences*, 7(10), 752-756.
- Sun, Z. A., Sun, T., and Wang, Y., 1997, Anomalous features of ground water behaviour in Banqiao well around the Shunyi Earthquake with M_s 4.0, *Beijing, Earthquake (Beijing)*, 17(4), 425-428.
- Tsunogai, U. and Wakita, H. 1995, Precursory chemical changes in ground water: Kobe Earthquake, Japan, *Science*, 269(5220), 61-63.

- Wang, C. Y. and Manga, M., 2010, Hydrologic responses to earthquakes and a general metric, *Geofluids*, 10(1-2), 206-216.
- Wang, W. X., Shi, Y. L., Zhang, J., and Shi, Y. H., 2009, Dynamic gravity changes before and after the 2006 Wen'an M5.1 Earthquake, Hebei province, *Earthquake (Beijing)*, 29(2), 40-47.
- Yoon, H., Kim, Y., Ha, K., and Kim, G. B., 2013, Application of groundwater-level prediction models using data-based learning algorithms to National Groundwater Monitoring Network data, *The Journal of Engineering Geology*, 23(2), 137-147 (in Korean with English abstract).
- Yoon, P., Yoon, H., Kim, Y., and Kim, G. B., 2014, A comparative study on forecasting groundwater level fluctuations of National Groundwater Monitoring Networks using TFNM, ANN, and ANFIS, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 19(3), 123-133 (in Korean with English abstract).

우남철

연세대학교 지구시스템과학과
120-749 서울시 서대문구 연세로 50
Tel: 02-2123-2674
E-mail: ncwoo@yonsei.ac.kr

Jize Piao

연세대학교 지구시스템과학과
120-749 서울시 서대문구 연세로 50
Tel: 02-364-9113
E-mail: piaojz@yonsei.ac.kr

이재민

연세대학교 지구시스템과학과
120-749 서울시 서대문구 연세로 50
Tel: 02-364-9113
E-mail: leejm03@gmail.com

이찬진

한국수자원공사 국가지하수정보센터
302-766 대전광역시 유성구 유성대로
Tel: 042-629-4450
E-mail: grndwt@kwater.or.kr

강인옥

한국수자원공사 국가지하수정보센터
302-766 대전광역시 유성구 유성대로
Tel: 042-629-4160
E-mail: iokang@kwater.or.kr

최두형

한국수자원공사 국가지하수정보센터
302-766 대전광역시 유성구 유성대로
Tel: 042-629-4161
E-mail: giaboss@kwater.or.kr