

## 지하수 모니터링을 통한 지진 감시 가능성: 중규모(M4.9) 오대산 지진의 관측

이현아 · 김민형 · 홍태경 · 우남철\*  
연세대학교 지구시스템과학과

### Earthquake Observation through Groundwater Monitoring: A case of M4.9 Odaesan Earthquake

Hyun A Lee · Minhyung Kim · Tae-Kyung Hong · Nam C. Woo\*  
Dept. of Earth System Sciences, Yonsei Univ.

#### Abstract

Groundwater monitoring data from the National Groundwater Monitoring Stations, a total of 320 stations, were analyzed to identify the response of water level and quality to the Odaesan earthquake (M4.9) occurred in January 2007. Among the total of eight stations responded to the earthquake, five wells showed water-level decline, and in three wells, water level rose. In terms of recovery, water levels in four stations had recovered to the original level in five days, but not in the rest four wells. The magnitude of water-level change shows weak relations to the distance between the earthquake epicenter and the groundwater monitoring station. However, the relations to the transmissivities of monitored aquifer in the station with the groundwater change were not significant. To implement the earthquake monitoring system through the groundwater monitoring network, we still need to accumulate the long-term monitoring data and geostatistically analyze those with hydrogeological and tectonic factors.

**Keywords :** Odaesan earthquake, water-level change, National Groundwater Monitoring Network, long-term groundwater monitoring

#### 1. 서 론

1970년대 이래 미국, 일본, 중국, 대만, 인도 등 지진 연구 분야의 선진국들을 중심으로 지진파를 통한 고체 지구의 변형이나 응력 분포의 변화 외의 다른 지진 지시자 또는 지진에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다(Roeloffs, 1988; Cicerone et al., 2009). 예를 들어, 지하수위 변화, 지하수 또는 토양 내의 라돈 농도 변화, 그리고 석유 흐름의 변화 등, 지질 매체에서 지반의 변동에 의해 발생할 수 있는 다양한 인자들을 장기적으로 감시하여 지진에 의한 시스템의 변화와 지진 예측의 보조 도구로 활용하기 위한 기술들을 활발히 연구하고 있다.

특히 지하수는 지질 매체에 의한 지구의 주기적인 변동에도 영향을 받는 요소로, 지진에 따른 지하수위의 변동은 전진(foreshock)에 의한 지진 전 변동(pre-seismic change), 지

진과 동시에 나타나는 지진 동시 변동(co-seismic change), 그리고 지진 이후에 발생하는 지진 후 변동(post-seismic change)으로 나뉘어 진다. 지진에 의한 지하수위 및 지표수의 유출량 변화는 이미 잘 알려진 사실이며(Rikitake, 1975), 정량적인 측정이 가능한 지하수위와 수질의 변동은 지진 감시와 예보에 있어 효과적인 것으로 보고된 바 있다(Chen et al., 2000; Che et al., 2006).

일본의 토카이(Tokai)와 칸사이(Kansai)지역, 이즈(Izu)반도에서는 1970년대부터 관측을 시작하여, 전진 또는 지진 지시자로서의 지하수 변동을 여러 차례 보고한 바 있다(Kitagawa et al., 1996; King et al., 1999; Ohno et al., 1999; King et al., 2000; Kitagawa and Koizumi, 2000; Ohno et al., 2006; Itaba et al., 2008). 중국에서도 인구가 밀집된 동부 지역에 관정을 집중적으로 설치하여 지진에 의한 지하수 변동을 관측하고 있으며(Che et al.,

\*Corresponding author : ncwoo@yonsei.ac.kr

원고접수일 : 2011. 4. 8 심사일 : 2011. 5. 9 게재승인일 : 2011. 5. 11  
질의 및 토의 : 2011. 8. 31 까지

2002), 대규모의 지진 전후 지하수위/수질 전반에 걸쳐 전 조 현상의 유무를 분석하였다(Che and Yu, 1992; Che et al., 1994; Geng et al., 1998; Liu et al., 2009; Wang et al., 2009; Yang et al., 2009; Yin et al., 2009). 이러한 연구를 통해서 대만의 Chi-Chi 지진 및 인도네시아 Sumatra 대지진, 중국의 Wenchuan 지진 등에 의한 지하수 위 변동이 관측되었으며, 대규모 지진에 의한 지하수위 변동은 수천 킬로미터가 떨어진 지역에서도 감지가 되는 것으로 보고 되었다(Chia et al., 2001; Brodsky et al., 2003; Huang et al., 2004; Wang et al., 2004; Muralidharan et al., 2005; Chadha et al., 2008).

지진의 빈도에 있어서는 대규모 지진보다 자주 나타나는 중규모(M5.0-6.0)의 지진에 의한 수위 변동에 관한 연구도 계속되고 있다. Sun et al.(1997)과 Ma et al.(2008)은 각각 M4, M5.1 규모의 지진에 의한 지하수위 이상을 보고하였고, Singh(2008)는 2005년 발생한 중규모(M5.1) 지진에 의한 인도 Koyana-Warna 지역의 지하수위 변동을 분석하여, 지하수위 변동의 주요 메커니즘으로 확산 기작(diffusion process)을 지목한 바 있다. 확산 기작은 기존의 단층과 단열대를 통해 지류지로부터 주변 지역으로 물이 이동할 때 공극압을 변동시켜 궁극적으로 지하수위의 변동이 관측되는 작용으로, 스트레스가 많이 누적된 매체에 대해서는 2차 지진을 유발할 수 있다(Pandey and Chadha, 2003). 한편 Ramana et al.(2007)은 Koyana 지역의 관정을 이용하여, 1997년, 1998년에 각각 일어난 중규모 지진에 의해 지하수위가 변하였음을 보고하며 작은 규모의 지진 활동 및 중규모의 지진에 의해서도 지하수위가 변할 수 있다고 결론 내렸다. 이런 지하수위의 반응에 대한 연구는 이 외에도 다양하여 진앙으로부터 거리에 따른 지하수위 변동 양상을 분석하는 연구도 이루어졌다(Roeloffs et al., 2003; Liu et al., 2006; Chadha et al., 2008).

그러나 이상의 연구들은 수위의 변이에만 집중하여 지하수 시스템의 변화 여부를 알려주는 지하수 수질 변화의 연구는 상대적으로 덜 이루어졌다. 지진에 의한 지하수 수질의 변화를 연구하는 경우에는 대수층과 토양층에 존재하는 라돈의 농도를 그 대상으로 한 사례가 있다(Wakita et al., 1980; Wakita et al., 1989; Ramola et al., 1990; Wakita et al., 1991; Monnin and Seidel, 1992; Plastino et al., 2002; Yasuoka et al., 2005; Miklavcic et al., 2008; Ramola et al., 2008; Kuo et al., 2009; Ramola, 2010). 하지만 이들은 모두 채수와 분석을 필요로 하며, 자동 관측기를 이용해 비교적 쉽게 측정할 수 있는 수온

의 변화와 전기전도도의 변화에 대한 연구는 상대적으로 적다(Wakita, 1981; Huang et al., 2004).

1970년대 이후 30~40년을 지속한 연구 선진국들과는 달리 우리나라는 지진에 따른 지하수위 및 수질의 변동에 대한 연구가 아직 시작 단계에 머물러 있다. 2008년 발생한 Wenchuan 지진에 의한 국가지하수관측망의 반응 및 제주도 지하수 관측망의 지하수위/수질 변이, 그리고 2007년 국내에서 발생한 오대산 지진에 대한 국가지하수관측망의 반응 등이 보고된 정도이다(이수형 외, 2009; Lee et al., 2009b; 이정환 외, 2010; 이현아 외, 2010; 옥순일 외, 2010; Kim et al., 2010; Lee et al., 2010).

이 연구는 국가지하수관측망 자료를 이용하여 지난 2007년 1월 20일 국내에서 발생한 중규모(M4.9)의 오대산 지진에 의한 지하수위 변화를 보고하고, 그 특성을 규명하고자 수행되었다.

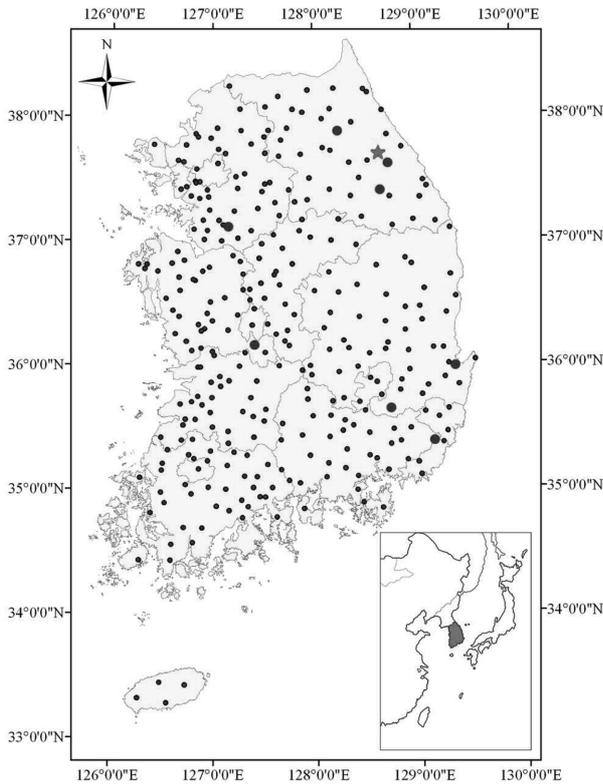
## 2. 자료 및 분석 방법

### 2.1. 오대산 지진

규모 4.9의 오대산 지진은 한국시간 2007년 1월 20일 20시 56분경 강원도 평창 오대산 인근에서 발생한 지진(37.68°N 128.59°E, 13km)으로 한반도 지진 관측 이래 8번째로 큰 규모였으며, 2000년대에 발생한 지진 중에서는 가장 큰 규모로 기록되었다(Fig. 1, KMA, KERC). 전진(foreshock)에 대해 따로 보고된 바는 없으나 기상청에서 보고된 바로는 1월 19일 오전 9시 6분경 오대산 지진의 진앙으로부터 북서방향으로 약 1.2 km 떨어진 정선 인근에서 규모 2.3의 지진이 발생하여, 기상청 울진 관측소에서 관측이 이루어졌다(KERC, 2007).

### 2.2. 자료

국가지하수관측망은 지하수의 수질 및 수위의 변동 및 경향성을 관측하고, 하천과의 관계 연구를 위해 1995년 처음 설치하기 시작하여 해마다 추가적으로 설치, 2010년 현재 총 320여 개의 관측소를 운영 중에 있다(Fig. 1). 각 관측소는 지하수위, 수온, 전기전도도를 관측할 수 있는 자동 기록계가 장치된 관측정을 2개 설치하여 각각 천부 자유면 대수층과 심부 단열 대수층을 관측 중에 있다. 국가지하수관측망 관측소의 관정은 각기 세 구간을 스크린하여 관측 중에 있어, 이 곳에서 관측된 결과는 이 세 대수층의 반응이 모두 반영된 결과이다. 관측 빈도는 2007년까지는 6시간 간격으로 관측을 하였으나, 2008년부터는 1시간 간격으로 관측하여 국가지하수정보센터(GIMS)의 중앙



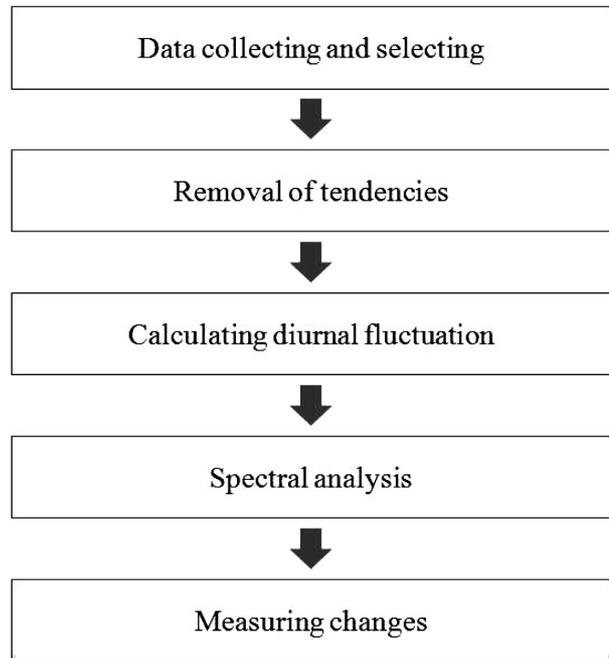
**Fig. 1.** Locations of observation stations of the Korean National Groundwater Monitoring System (GIMS, 2009). Blue-colored ones represent the responded eight wells and red star indicates the epicenter of M4.9 Odaesan earthquake (KERC, 2007).

서버로 자동 전송하고 있다(<http://www.gims.go.kr/>).

이 연구에서는 2007년 1월 320개 관측소 심부 관정에서 획득된 지하수위, 수온, 그리고 전기전도도를 사용하였다. 자료 비교를 위한 강수 자료는 각 관측소에서 가장 가까운 기상 관측소를 선택하여 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)로부터 자료를 취득하여 사용하였다(<http://www.wamis.go.kr/>).

**2.3. 자료의 분석 단계와 방법**

김민형(2011)에 따르면, 지진에 의한 지하수 변동 자료를 분석하는 방법에는 크게 네 가지가 있다. 먼저, 진폭 변형 방법이 있다. 이 방법은 원래의 자료에서 지구물리학적 현상에 의해 발생하는 교란을 없애며, 피압대수층의 대기압에 대한 반응, 공극의 탄성 계수, 전단응력을 등의 자료가 필요하다(Roeloffs, 1998). 한편, 측정 시간 당 변화율을 자료가 가지는 일변동값의 표준편차와 비교하여 비교적 단기간에 변한 값을 찾아내는 지구통계기법이 있다(Ondoh, 2009). Hilbert-Huang 변환 방법은 비교적 최근에 제안된 것으로(Huang et al., 1998), 지하수 유동과



**Fig. 2.** Processing diagram for this study.

같은 비선형 자료에 유리하다. 마지막으로, 푸리에 변환을 사용한 방법은 지하수가 가지는 주기적인 변동에 착안하여, 1일, 반일 주기와 같은 강한 영향력(power)를 가지는 성분을 원자료에서 제거함으로써 불규칙한 변이를 찾아내는 것이다(Lee et al., 2009a).

이 연구에서는 대기압 보정된 자료를 국가지하수정보센터로부터 제공받아 푸리에 변환을 사용한 스펙트럼 분석을 수행하였다. 자료의 분석단계와 세부 방법은 다음과 같다(Fig. 2).

(1) 자료의 선별: 실제 분석에 앞서 인위적인 활동이 많은 도시 지역의 지하수위 및 수질 자료를 제거하였고, 자연적인 일주기 성분에 의한 변이가 큰 해안 지역의 전기전도도 자료 역시 배제하였다.

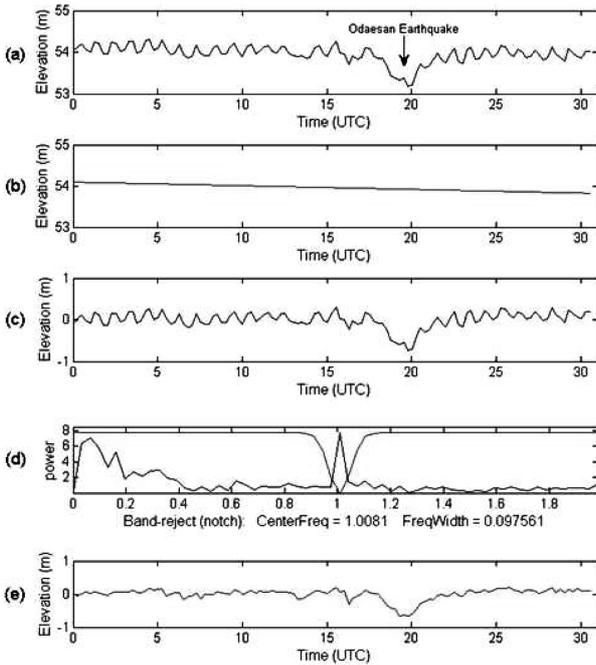
(2) 경향성 제거: 스펙트럼 분석을 적용하기 위해서는 자료에 경향성이 없는 상태여야 하므로, 지하수위의 계절별 변동 경향성을 제거하기 위하여 단순 선형 회귀선을 적용, 선형의 경향성을 제거하였다.

(3) 일주기 변동량 산정: 일평균 변화량의 산정은 지진에 의해 변화된 양을 자연적인 변화의 규모와 비교하고자 수행되었다. 산정 방법은 일 최고 수위에서 일 최저 수위를 빼어 평균하는 것으로 이루어졌다.

(4) 스펙트럼 분석: 이 연구에서는 스펙트럼 분석의 일종인 푸리에 변환을, 자연에서 가장 두드러지는 24시간 주기 성분을 제거하고자 사용하였다. 푸리에 변환은 광역

적인 에너지-주기 분포에 대한 연구에 사용되어 온 일반적인 방법이다(Huang et al., 1998). 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 바꾼 후 bi-directional Butterworth 필터를 사용해 일주기 성분을 제거하였다. 이 작업은 상용 프로그램인 MATLAB 7.0.4(MathWorks, 2005)를 이용하여 처리하였다(Fig. 3).

(5) 지진에 의한 변화량 산정: (4)의 결과를 바탕으로



**Fig. 3.** Schematic diagram of spectral analysis using MATLAB7.0.4. (MathWorks, 2005) with data of station Cheongdo-Cheongdo. (a) Original data, (b) calculated trend, (c) de-trended signal, (d) Analyzed spectrum through Fourier transform in frequency domain and the applied filter (red line) (e) filtered signal.

지진 발생 전 최종 관측값과 변동 최대치를 보이는 시점을 기준으로 지진에 의한 변화량이 계산되었다.

### 3. 결 과

연구기간인 2007년 1월에 전국적으로 강수를 보인 날씨는 1월 6일이고, 지역에 따라 1월 2일-4일, 15일-18일, 22-24일, 26일, 28일 등 산발적으로 강수가 발생하였다. 1월 6일과 26일의 일일 강수량은 지역에 따라 5 mm 이상의 강우가 발생한 곳이 있지만, 그 외는 5 mm 이하로 양이 적었다(KMA, WAMIS). 전술한 방법(Fig. 2)으로 장기적 경향성과 주기적 일변동을 제거한 결과, 총 8개의 관점에서 지하수위의 변동이 관측되었다(Table 1).

진앙으로부터 가장 가까이 위치한 강릉왕산 관측소 인근은 1월 한 달 동안 비가 내리지 않았다. 암반층 관정은 19일 정선 인근에서 발생한 지진에는 반응하지 않았으나 오대산 지진 발생 직후부터는 이전의 하강속도(-2.0cm/d)와 다르게 급격한 속도(-21.0cm/d)로 지하수위가 하강, 24시간 후까지 약 21 cm가 감소하였다(Fig. 4a). 24시간 후부터는 지진 발생 전의 하강 속도로 복귀하였으나, 수위는 자료 기간(2007년 1월) 동안 회복되지 않았다.

한편, 정선정선 관측소(Fig. 4b)에서는 19일 지진에 의한 변동은 보이지 않으나, 20일 오대산 지진으로 인해서 76 cm의 하강을 보였다. 이는 지진 전 관측된 변동폭인 35.2 cm의 두 배 이상이다. 하지만 14-17일의 데이터 수득 이상으로 이상 현상 전후로 수위가 약 3 m 가량 상승하여 스펙트럼 분석을 할 수 없었기 때문에 정확한 변이량을 추정하기는 힘들다. 이상 현상 발생 중 기기의 관측은 가능하였고, 정선정선 관측소의 암반 대수층은 투수계

**Table 1.** Water-level changes due to series of earthquakes and hydraulic conductivity K of aquifers

No	Station	Prec. Data	**D <sup>1</sup> (Km)	K (cm/sec)	T (m <sup>2</sup> /d)	***PDC (cm)	ΔH (cm)	**D <sup>2</sup> (m)	****RC
1	Gangneung-Wangsan	O	15.8	1.78E-05	0.768	2.0	-21	800	NR
2	Jeongseon-Jeongseon	*X	34.0	1.16E-03	0.359	35.2	-76	100	NR
3	Inje-Sangnam	O	35.1	3.65E-05	1.57	7.6	14	40	NR
4	Yongin-Namsa	O	142.2	1.63E-03	4.50	4.7	-28	10	9d
5	Geumsan-Boksu	O	199.7	2.52E-03	45.8	9.0	16	10	2d
6	Pohang-Jangheung	O	202.4	1.51E-04	5.78	3.0	10	400	5d
7	Cheongdo-Cheongdo	O	228.3	9.90E-03	428	24.9	-66	20	4d
8	Yangsan-Woongsan	O	260.7	1.77E-05	0.763	3.7	-8	100	NR

\*Station Jeongseon-Jeongseon has no precipitation observatory in near area.

\*\*D<sup>1</sup>: a distance from epicenter; D<sup>2</sup>: a distance from the nearest stream;

\*\*\*PDC: pre-seismic diurnal change;

\*\*\*\*RC: time to recovery; NR: not recovered its former level in study period

수가 낮아 작은 압력 변화에도 민감한 만큼 기기의 고장이 아닌 오대산 지진과 관련된 전조 현상의 일부로 판단하고 있다.

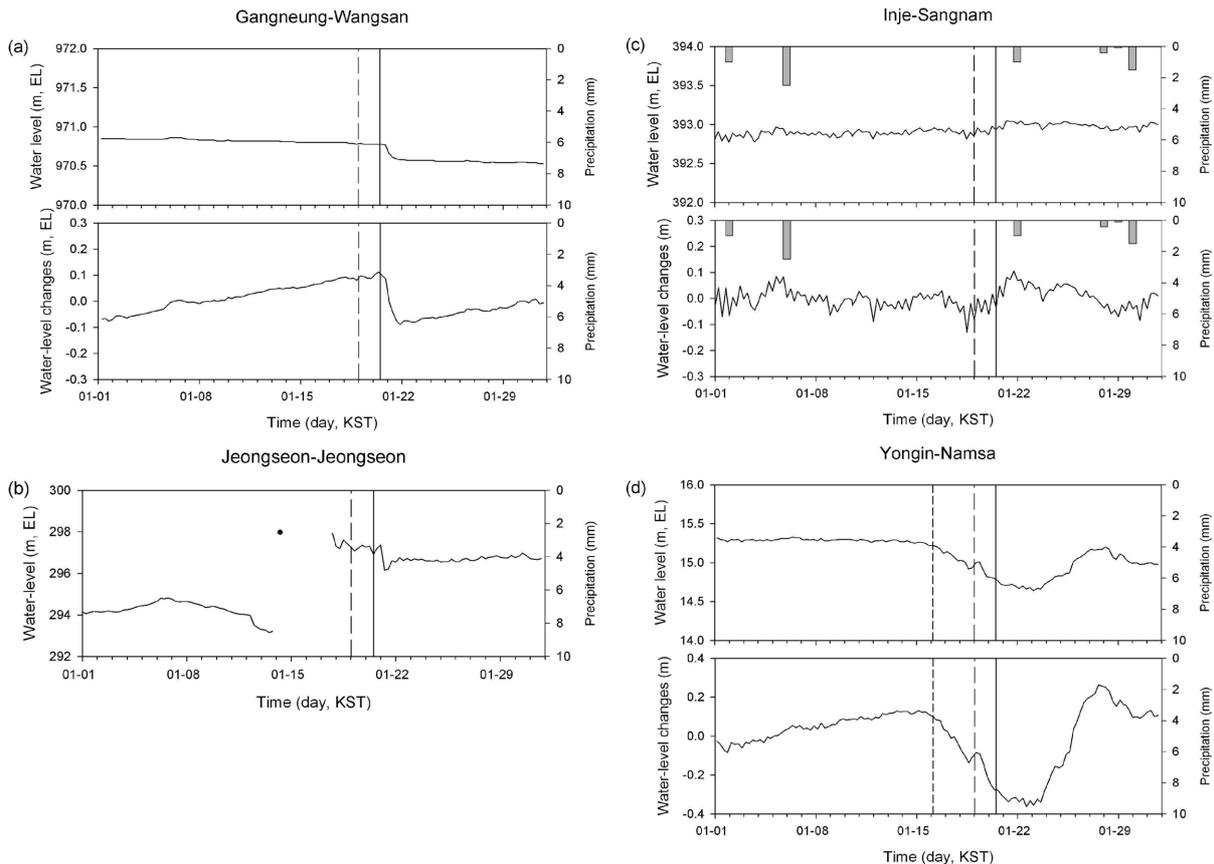
평시 7.6 cm의 일일 변동폭을 가진 인제상남 관측소 (Fig. 4c)에서는 총 14 cm의 변동이 관측되었다. 진앙으로부터 정선정선 관측소보다 약 1.1 km 더 멀리 떨어져있는 인제상남에서는 19일 지진 이후부터 무강우 기간임에도 불구하고 상승을 보였다. 이렇게 상승된 수위는 22일부터 하강세를 가지나 이후의 강우들로 인해 회복이 상쇄된 것으로 보인다.

용인남사 관측소(Fig. 4d)에서는 관측된 자료의 경우에는 16일경부터 지하수위가 먼저 하강을 시작했다가 반등 되려는 시점에서 19일 지진이 발생하였고, 20일의 오대산 지진이 그 뒤를 따랐다. 지진에 앞선 지하수위 하강은 지하수 사용에서 볼 수 있는 규칙적인 패턴과 다르고, 농한 기임을 미루어보아 인위적인 요인보다는 한국시각 16일

3시 18분에 도쿄 앞바다에서 발생한 지진(M5.7, short dashed line in Fig. 4d)에 의한 영향이거나 지진전조로 판단된다.

한편 금산복수 관측소(Fig. 4e)에서는 19일 지진에 의한 영향은 없었으나 오대산 지진 후에는 지하수위가 상승하였고 지속시간은 2일로 짧았다. 1월 6일의 강수에도 불구하고, 계속 하강하는 경향성을 보이는 금산복수의 암반 관측정은 강수보다는 다른 요인에 의한 영향을 받는 것으로 보인다. 오대산 지진에 앞서 크게 변동한 부분의 경우 인위적인 활동은 일정한 주기를 가지고 일어나는 것을 고려할 때 비 인위적인 요소에 의한 것으로 보이나 지진과의 관련성은 명확하지 않다.

진앙으로부터 약 202 km 떨어져있는 포항장흥 관측소 (Fig. 4f)의 경우는 19일 지진 이후 10 cm 가량의 상승을 보여주었으며 오대산 지진 이후에는 수위가 감소하여 5일 만에 회복이 되었다. 강수 사건과 상관없이 각각의 지진



**Fig. 4.** Temporal variation of water level (above) and their result of spectral analysis (below) observed at (a) Gangneung-Wangsan, (b) Jeongseon-Jeongseon, (c) Inje-Sangnam, (d) Yongin-Namsa, (e) Geumsan-Boksu, (f) Pohang-Jangheung, (g) Cheongdo-Cheongdo, and (h) Yangsang-Woongsang. Dashed vertical line represents the time of foreshock (M2.3), and solid one indicates the time of origin of Odaesan Earthquake. Short dashed line in (d) means the time of origin of earthquake occurred in Tokyo bay area (M5.7). No precipitation data is provided for Jeongseon-Jeongseon and Geumsan-Boksu.

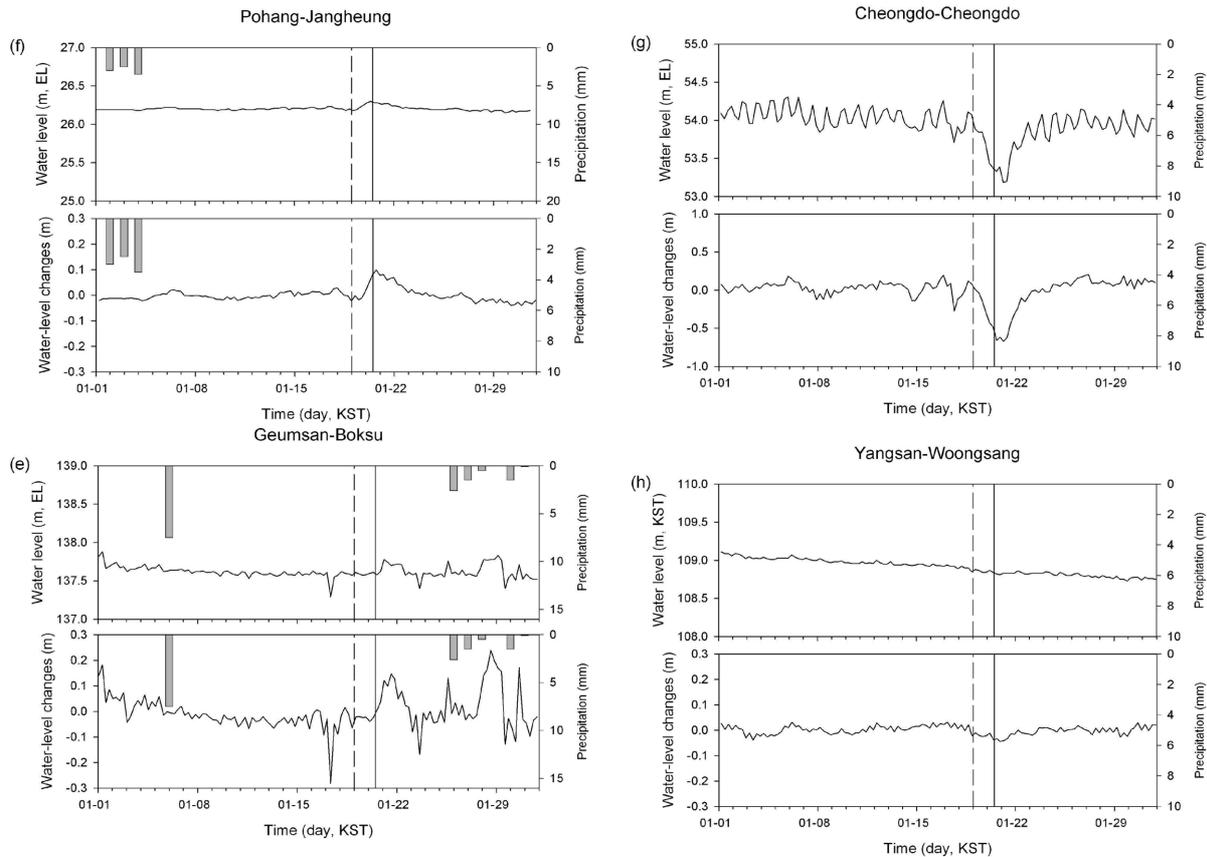


Fig. 4. continued.

발생 시각 전의 변동량 및 경향성에 비해 큰 차이를 보이는 포항 장흥은 두 지진의 영향을 모두 받은 것으로 보인다.

청도청도 관측소(Fig. 4g)는 진앙으로부터 약 230 km 가량 떨어져 있음에도 불구하고, 66 cm의 큰 하강을 보였다. 특히 19일 지진 이후 떨어지기 시작하고 오대산 지진 이후로는 상승하는 모습을 보였다. 다른 지역에 비해 수위의 일변화가 크게 보이는 지역인 청도 지역에서의 이 변화는 일반적으로 작용하는 것보다 더 큰 교란이 작용하여 지하수위 변동을 일으켰음을 의미한다. 2007년 1월 청도 지역에서는 강수가 관측되지 않았다.

양산양상 관측소(Fig. 4h)의 경우 반응한 관측소 중에서는 가장 멀리 떨어져있으나 오대산 지진에 의해 지하수위가 하강하고, 자연배수율(-1.0 cm/d)이 잠시 바뀌었음을 보여준다. 이 시기 양산 지역에서는 강수가 기록되지 않았으므로 외부 요인이 없다면 자연적인 배수만이 작용, 일정한 경향성을 가지는 움직임을 보여야 하나, 지진 시각 직후의 하강 속도의 차이(지진 직후 이틀간 0 cm/day)는 이 지역에도 지진의 영향이 있음을 알려준다.

## 4. 고찰

### 4.1. 20일 오대산 지진과 전진의 영향

Stejskal et al.(2009)은 규모 2.4와 3.3을 보인 지진의 진앙으로부터 각각 11.3 km와 16.8 km 떨어진 지점에서 관측된 지하수위 변동을 보고하였다. 이때 지하수위는 6 cm, 15 cm 각각 상승하였다. 이와 함께 이들은 M3.5 이하의 지진은 구조적으로 약한 부분에 존재한다고 파악되는 반응성이 좋은 관측공에서만 관측된다고 추론하였다.

2007년 1월 19일 오전 9시경 정선에서 발생한 지진은 규모가 2.3으로 규모 4.9의 오대산 지진에 비하여는 방출되는 에너지가 16,000배 가량 적다. 하지만 지질학적인 조건에 따라 거리에 따른 감쇄량은 다른 만큼, 그 영향력을 배제할 수 없다. 정선정선 관측소에서 나타난, 오대산 지진 전 지하수위 변동은 이 지진의 영향으로 보인다.

### 4.2. 오대산 지진에 대한 지하수위의 반응

이전 연구에 의하여 지하수의 반응에 영향을 미치는 인자로 지목된 것들은 진앙과 관측공 사이의 거리 뿐만 아

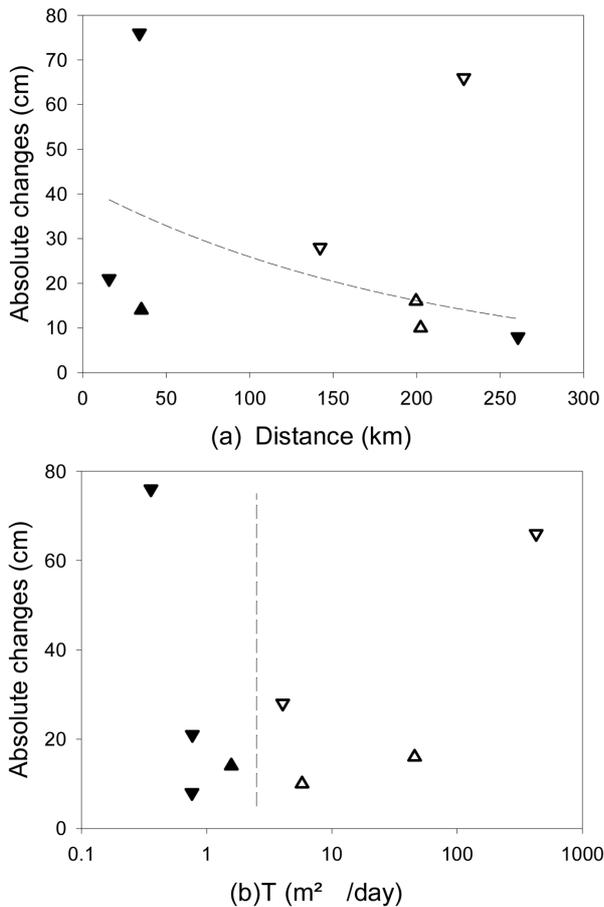


Fig. 5. Magnitude of water-level change to (a) distance from epicenter; (b) transmissivity T. All of water-level changes are converted to modulus. Triangle ups: water-level increased by EQ; Triangle downs: declines in water-level; solid ones: water-level weren't recovered; open ones: water-level of the well was recovered to pre-seismic value. See also Table 1.

나라 전/후 지진의 존재, 단층과의 거리, 지질 매체, 수리 전도도 또는 투수계수, 대수층 성격 등의 지질학적 조건과 수리지질학적 조건이다(King et al., 2000; Liu et al., 2006; Chadha, 2008). 이들은 지하수위/수질이 변이를 보이는 지속 시간 및 회복 시간, 변동이 일어나는 시간(지진 전/동시/후) 등을 제어하지만 그보다 지하수위/수온/전기전도도 값의 변화량 및 변이 방향(상승/하강)을 제어한다는 점에서 매우 중요하다.

오대산 지진에 의한 영향으로 판단되는 지하수 관측공까지의 거리에 따른 지하수위의 변동량을 살펴보면, 청도 청도를 제외하고는 전반적으로 거리가 멀어지면서 수위 변동의 절대치가 줄어드는 약한 경향성을 띤다(Fig. 5a). 이는 거리에 따라 그 절대값이 줄어드는 이전의 연구 결과들(Roeloffs, 1988; Chia et al., 2001; Liu et al., 2006)

과 일치한다. 진원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 지진으로부터 방출된 에너지는 감쇠현상이 일어나기 때문이다. 약 200 km 떨어진 청도청도 관측소(Table 1 #7, Fig. 4 g)에서 관측된 큰 변동값은 지역의 수리지질학적/지질학적 조건에 따른 수위변화의 결과로 판단되며, 이에 대해서는 보다 상세한 연구가 필요하다. 수위 회복에 대해서는 거리가 가까운 관정에서는 회복이 나타나지 않았으며, 거리가 먼 경우에는 회복이 수일 내에 이루어는 것을 확인할 수 있다.

반면 투수계수에 대한 지하수위의 변동량은 명확한 경향성은 보이지 않는다(Fig. 5b). 다만 상대적으로 투수계수가 낮은 관정에서는 변동된 지하수위가 자료 분석 기간 중에는 원래의 높이로 회복되지 않음이 관측되었고, 이와 대조적으로 투수계수가 비교적 높은 관정에서는 지진에 의한 지하수위 변화가 회복되었다. 진앙에서 가까운 관정들의 경우(Fig. 5a)는 회복이 되지 않았는데 지진 에너지에 의해서 지하수 유동 시스템이 변화한 것으로 보이며, 투수계수가 높은 관정들은 대수층에서 관정으로의 물이 유입이 빨라 회복이 된 것으로 판단된다. 지하수위가 하강 또는 상승했다가 원래의 수위로 회복되지 않는 것은 영구적인 대수층 시스템의 변화를 지시한다. 이는 지하수 유동 체계의 변화를 의미하므로, 유역의 지하수 자원 관리에 있어 향후 중요한 문제가 될 수 있다.

### 4.3. 자료의 획득 주기 및 분석법의 영향

본 연구에서는 6시간 간격으로 관측된 자료를 이용하여 스펙트럼 분석을 실시하였다. 국가지하수 관측망의 자료는 2007년 말까지 6시간 간격으로 관측하였으며, 이때 원 자료를 분석해보면 각 관측공 별로 관측 주기는 같을 뿐 동일 시각에 관측이 전면적으로 이루어지지 않았다. 반응을 보인 관측소의 경우 이 관측 시간이 지진 발생 시간과 인접한 경우, 즉 국내 시간으로 21시 또는 22시 경 관측값이 기록된 관측소이며, 관측 시간과 지진 발생 시간 사이의 간격이 클 경우 지진의 영향은 확인하기 어려웠다.

지하수의 주기적 변동에 영향을 주는 자연적인 요인은 조석, 지구조석, 증발산, 주기적인 취수, 그리고 강우 패턴과 같은 기후 영향 등이 있는데 이들은 각각 약 12시간 ~1년의 주기를 가지고 있다. 더불어 심부의 비포압 대수층이나 암반 대수층의 경우 지진파에 의한 영향을 같이 받기 때문에 짧은 주기의 성분을 간직할 수 있다. 넓은 간격의 자료 취득의 경우 이렇게 짧은 주기의 성분을 고려하지 않아도 된다는 장점이 있지만, 자료의 불충분으로

인한 왜곡현상이 발생할 수도 있다. 현재 2008년 이후 획득된 1시간 간격 자료의 분석을 통해 자료 간격이 가져오는 결과에 대한 분석을 수행하고 있으며, 그 결과는 이번 연구를 개선하는데 도움이 될 것이다.

나아가, 스펙트럼 분석은 시스템이 선형이어야 하고, 자료가 주기성을 가진, 정류상태이어야 하는 단점이 있어, 정류상태로 만들어주기 위해 선형 경향을 분석 전 미리 삭제해야 한다. 이 과정을 거친 자료는 새로운 경향성이 나타나는 것처럼 보일 수 있다. 이후 연구에서는 비선형 시스템에 적용할 수 있는 분석법 또는 자료 판단법을 제시해야 할 것이다.

## 5. 결 론

2007년 M4.9 오대산 지진에 의한 지하수위 및 수질의 반응과 그 양상을 살피기 위해 전국 320개의 국가지하수 관측망 암반 대수층 관점에서 2007년 1월에 관측된 수위/수질 자료 분석하였다. 분석 결과 총 8개소의 관정이 지진에 의한 반응을 보였으며, 8개소 중 5개 관정의 지하수위가 감소, 3개의 관정이 증가하였고 포항장흥 관측소의 전기전도도는 감소하였다. 지진에 의해 변동된 양상을 살펴보면, 4개의 관측정이 영구적인 수위변화를, 4개소의 자료는 5일 이내의 회복을 보였다.

진원과 관측정 사이의 거리에 따라 지하수위의 변동량은 약한 반비례 관계를 보여, 거리가 멀어질수록 지하수위의 변동량은 줄어들었다. 그러나 지하수위의 변동량은 투수계수와는 상관관계가 거의 없는 것으로 보인다.

현재 우리나라의 연구 단계는 초기 단계로, 양질의 연구를 위하여는 많은 자료의 수집/축적과 함께 지질학적/수리지질학적 조건에 따른 지하수위 및 수질 인자의 반응을 정리하는 것이 필요하다.

## 사 사

본 연구는 기상지진연구센터 과제(CATER 2010-5305) 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

김민형, 2011, 지진에 의한 지하수 변동 자료 분리도출 방안 연구, 연세대학교 대학원 석사학위논문.  
 옥순일, 함세영, 김봉상, 정재열, 우남칠, 이수형, 고기원, 박윤석, 2010, 제주도 서반부의 대수층 체계와 지진에 의한 지하수위 변

동 특성, 자원환경지질, **43**(4), 359-369.

이수형, 함세영, 박윤석, 고기원, 정재열, 이정환, 2009, 한반도 주변 지진활동에 의한 제주도의 지하수위 변동 특성, 한국지하수도양환경학회 춘계학술발표회, 한국지하수도양환경학회, 고려대학교, 서울, p. 103-104.

이정환, 함세영, 정재열, 옥순일, 차은지, 고기원, 박윤석, 우남칠, 2010, 쓰촨성지진에 의한 제주도의 지하수위 변동 특성, 춘계 지질과학기술 공동학술대회 논문집, 대한자원환경지질학회, 대구 EXCO, p. 44.

이현아, 우남칠, 홍태경, 2010, Earthquake observation through groundwater monitoring – Detection of Anomalous Water-level and quality change, 춘계 지질과학기술 공동학술대회, 대구 EXCO, p. 43.

Brodsky, E.E., Roeloffs, E., Woodcock, D., Gall, I., and Manga, M., 2003, A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **108**(B8), 2390, doi:10.1029/2002JB002321.

Chadha, R.K., Kuempel, H.J., and Shekar, M., 2008, Reservoir Triggered Seismicity (RTS) and well water level response in the Koyna-Warna region, India, *Tectonophysics*, **456**(1-2), 94-102.

Che, Y. and Yu, J., 1992, Preliminary approach to quality-evaluation method of seismo- groundwater observation wells, *Earthquake (Beijing)*, **1**(1), 57-62.

Che, Y., Yu, J., Zhang, D., Sun, Z., Jian, C., and Peng, G., 1994, Annual regime characteristics of water level in bedrock wells in Beijing plain, *Seismology & Geology*, **16**(3), 255-263.

Che, Y., Yu, J., Zhang, S., Fan, X., Guo, J., Zhang, T., and Yang, J., 2002, The records of water level precursors and their discussion in Well Shuozhou, Shanxi Province, *Acta Seismol. Sin. (now Earth Sci.)*, **24**(2), 216, doi:CNKI:SUN:DZXB.0.2002-02-012.

Che, Y.T., Zhao, W.Z., Yu, J.Z., and Liu, C.L., 2006, Digitalized well-water-level observation and monitoring efficiency evaluation of earthquake precursor in the Beijing-Tianjin-Hebei region, *Earthquake*, **26**(4), 103-112.

Chen, A. T., Ouchi, T., Lin, A., Chen, J., and Maruyama, T., 2000, Phenomena associated with the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan, possible precursors and after effects, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **11**(3), 689-700.

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, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **91**(5), 1062-1068.

Cicerone, R.D., Ebel, J.E., and Britton, J., 2009, A systematic compilation of earthquake precursors, *Tectonophysics*, **476**(3-4), 371-396.

Geng, J., Zhang, Z., Wei, H., and Wang, Z., 1998, Dynamic pat-

- tern of groundwater level before and after the Tangshan earthquake and its mode of formation and evolution, *Dizhen Dizhi*, **20**(3), 255-260.
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C.C., and Liu, H.H., 1998, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proc. Roy. Soc. London A*, **454**, 903-995.
- 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, Ms7.6 Chi-Chi Earthquake, *Tectonophysics*, **390**(1-4), 217-234.
- Itaba, S., Koizumi, N., Matsumoto, N., Takahashi, M., Sato, T., Ohtani, R., Kitagawa, Y., Kuwahara, Y., and Ozawa, K., 2008, Groundwater level changes related to the ground shaking of the Noto Hanto Earthquake in 2007, *Earth Planets Space*, **60**(12), 1153-1159.
- Kim, M., Lee, H.A., Woo, N.C., and Hong, T.K., 2010, Changes in groundwater level, temperature and EC due to Sichuan earthquake M7.8 in Korea National Groundwater Monitoring Network, *Proceedings of 2010 Western Pacific Geophysical Meeting*, American Geophysical Union, Taipei, Taiwan.
- 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, *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, **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, *Geophys. J. Int.*, **143**(2), 469-477.
- Kitagawa, Y. and Koizumi, N., 2000, A study on the mechanism of coseismic groundwater changes, Interpretation by a groundwater model composed of multiple aquifers with different strain responses, *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, **105**(B8), 19121-19134.
- Kitagawa, Y., Koizumi, N., and Tsukuda, T., 1996, Comparison of postseismic groundwater temperature changes with earthquake-induced volumetric strain release, Yudani hot spring, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **23**(22), 3147-3150.
- Kuo, T., Lin, C., Fan, K., Chang, G., Lewis, C., Han, Y., Wu, Y., Chen, W., and Tsai, C., 2009, Radon anomalies precursory to the 2003 Mw = 6.8 Chengkung and 2006 Mw = 6.1 Taitung earthquakes in Taiwan, *Radiat. Meas.*, **44**(3), 295-299.
- Lee, H.A., Hong, T.-K., Kwon, H., Lim, J.-H., and Woo, N.C., 2009a, Effects of Evapotranspiration and Earth Tides on the Water-Level Fluctuation in a Forest Catchment in Gwangneung, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**(2), 113-120.
- Lee, H.A., Woo, N.C., and Hong, T.K., 2009b, Observation of anomalous groundwater level changes, monitoring of moderate-size earthquake in Korea, *Proceedings of 2009 AGU Fall meeting*, American Geophysical Union, San Francisco.
- Lee, H.A., Kim, M., Hong, T.K., and Woo, N.C., 2010, Groundwater changes in groundwater level, temperature, and EC due to moderate-size earthquake M4.8 in Korea, *Proceedings of 2010 Western Pacific Geophysical Meeting*, American Geophysical Union, Taipei, Taiwan.
- Liu, C., Huang, M.W., and Tsai, Y.B., 2006, Water level fluctuations induced by ground motions of local and teleseismic earthquakes at two wells in Hualien, Eastern Taiwan, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **17**(2), 371-389.
- 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 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*, **28**(1), 73-78.
- Miklavcic, I., Radolic, V., Vukovic, B., Poje, M., Varga, M., Stanic, D., and Planinic, J., 2008, Radon anomaly in soil gas as an earthquake precursor, *Appl. Radiat. Isotopes*, **66**(10), 1459-1466.
- Monnin, M.M. and Seidel, J.L., 1992, Radon in soil-air and in groundwater related to major geophysical events.: A survey, *Nucl. Instrum. Meth. A*, **314**(2), 316-330.
- Muralidharan, D., Andrade, R., Laxminarayana, G., Swathi, T., and Swetha, T., 2005, Imprint of 26 December 2004 Sumatra earthquake in aquifers of Hyderabad granite pluton, *Curr. Sci. India*, **89**, 1083-1086.
- 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, *Geophys. Res. Lett.*, **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. Appl. Geophys.*, **163**(4), 647-655.
- Ondoh, T., 2009, Investigation of precursory phenomena in the ionosphere, atmosphere and groundwater before large earthquakes of  $M > 6.5$ , *Adv. Space Res.*, **43**, 213-223.
- Pandey, A.P. and Chadha, R.K., 2003, Surface loading and triggered earthquakes in the Koyna-Warna region, western India, *Phys. Earth. Planet. In.*, **139**, 207-223.
- Plastino, W., Bella, F., Catalano, P.G., and Di Giovambattista, R., 2002, Radon groundwater anomalies related to the Umbria-Marche September 26, 1997, earthquakes, *Geofisica Internacio-*

- nal, **41**(4), 369-375.
- Ramana, D.V., Chadha, R.K., Singh, C., and Shekar, M., 2007, Water level fluctuations due to earthquakes in Koyna-Warna region, India, *Nat. Hazards*, **40**(3), 585-592.
- Ramola, R.C., 2010, Relation between spring water radon anomalies and seismic activity in Garhwal Himalaya, *Acta Geophys.*, **58**(5), 814-827.
- Ramola, R.C., Prasad, Y., Prasad, G., Kumar, S., and Choubey, V.M., 2008, Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya, *Appl. Radiat. Isotopes*, **66**(10), 1523-1530.
- Ramola, R.C., Singh, M., Sandhu, A.S., Singh, S., and Virk, H.S., 1990, The use of radon as an earthquake precursor, *Nucl. Geophys.*, **4**(2), 275-287.
- Rikitake, T., 1975, Earthquake precursors, *B. Seismol. Soc. Am.*, **65**, 1133-1162.
- Roeloffs, E., 1988, Hydrologic precursors to earthquakes: A review, *Pure. Appl. Geophys.*, **126**(2-4), 177-209.
- Roeloffs, E., 1998, Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **103**, 869-889.
- Roeloffs, E., Sneed, M., Galloway, D.L., Sorey, M.L., Farrar, C.D., Howle, J.F., and Hughes, J., 2003, Water-level changes induced by local and distant earthquakes at Long Valley caldera, California, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, **127**(3-4), 269-303.
- Singh, V.S., 2008, Impact of the Earthquake and Tsunami of December 26, 2004, on the groundwater regime at Neill Island (south Andaman), *J. Environ. Manage.*, **89**(1), 58-62.
- Stejskal, V., Kasperek, L., Kopylova, G.N., Lyubushin, A.A., and Skalsky, L., 2009, Precursory groundwater level changes in the period of activation of the weak intraplate seismic activity on the NE margin of the Bohemian Massif (central Europe) in 2005, *Stud. Geophys. Geod.*, **53**(2), 215-238.
- Sun, Z. a., Sun, T., and Wang, Y., 1997, Anomalous features of ground water behaviour in Banqiao well around the Shunyi earthquake with Ms 4.0, Beijing, *Earthquake (Beijing)*, **17**(4), 425-428.
- Wakita, H., Igarashi, G., Nakamura, Y., Sano, Y., and Notsu, K., 1989, Coseismic radon changes in groundwater, *Geophys. Res. Lett.*, **16**(5), 417-420.
- Wakita, H., Igarashi, G., and Notsu, K., 1991, An anomalous radon decrease in groundwater prior to an M6.0 earthquake: A possible precursor?, *Geophys. Res. Lett.*, **18**(4), 629-632.
- Wakita, H., Nakamura, Y., Notsu, K., Noguchi, M., and Asada, T., 1980, Radon anomaly, 1980, A possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake, *Science*, **207**(4433), 882-883.
- Wang, C.Y., Wang, C.H., and Kuo, C.H., 2004, Temporal change in groundwater level following the 1999 (Mw = 7.5) Chi-Chi earthquake, Taiwan, *Geofluids*, **4**(3), 210-220.
- 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*, **29**(2), 40-47.
- Yang, M., Kang, Y., and Zhang, Q., 2009, Decline of groundwater table in Beijing and recognition of seismic precursory information, *Earthquake Science*, **22**(3), 301-306.
- Yasuoka, Y., Ishii, T., Tokonami, S., Ishikawa, T., Narazaki, Y., and Shinogi, M., 2005, Radon anomaly related to the 1995 Kobe earthquake in Japan, *International Congress Series*, **1276**, 426-427.
- Yin, X.C., Zhang, L.P., Zhang, Y.X., Pang, K.Y., Wang, H.T., Song, Z.P., and Yuan, S., 2009, Large scale LURR anomaly before wenchuan earthquake, *Earthquake*, **29**(1), 53-59.

## 참고 웹사이트

- GIMS (National Groundwater Information Management and Service center), <http://www.gims.go.kr/>
- KMA (Korea Meteorological Administration) <http://www.kma.go.kr/>
- WAMIS (Water Management Information System) <http://www.wamis.go.kr/>
- KERC (Korea Earthquake Research Center) <http://quake.kigam.re.kr/>