

지진에 의한 제주도 지하수위 변동 분석 (2010년 인도네시아 규모 7.7 지진)

이수형¹ · 함세영^{2*} · 하규철^{1*} · 김용철¹ · 정범근¹ · 고경석¹ · 고기원³ · 김기표³

¹한국지질자원연구원, ²부산대학교 지구환경시스템학부, ³제주특별자치도 수자원 본부

Analysis of Groundwater Level Changes Due to Earthquake in Jeju Island (For the Indonesian Earthquake with Magnitude 7.7 in 2010)

Soo-Hyoung Lee¹ · Se-Yeong Hamm^{2*} · Kyoochul Ha^{1*} · YongCheol Kim¹ · Beom-Keun Cheong¹
Kyung-Seok Ko¹ · Gi Won Koh³ · Gee-Pyo Kim³

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Division of Earth Environmental System, Pusan National University

³Water Resource Headquarter, Jeju Special Self-Governing Province

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the relationship between groundwater level change and a large earthquake using the data of groundwater and seawater intrusion monitoring wells in Jeju Island. Groundwater level data from 13 observation wells were analyzed with a large earthquake. The Earthquake occurred at Sumatra, Indonesia (Mw = 7.7) on 13 June 2010, and groundwater level anomalies which seems to be related to the Earthquake were found in 6 monitoring wells. They lasted for approximately 16~27 minutes and the range of groundwater level fluctuations were about 1.4~2.4 cm. Coefficient of determination values for relationship between groundwater level change and transmissivity, and response time were calculated to be $R^2 = 0.76$ and $R^2 = 0.96$, respectively. The study also indicates that the high transmissivity of aquifer showed the high groundwater level changes and longer response time.

Key words : Earthquake, Groundwater level change, Jeju Island, Transmissivity, Indonesian earthquake

1. 서 론

최근에 세계적으로 환경변화 및 지질재해가 많이 발생하고 있는 실정이고, 이 중 수문학자들과 수리지질학자들의 의해 전 세계적으로 규모가 큰 지진에 대한 수문학적 및 수리지질학적인 변화에 관한 메커니즘을 규명하고자 하는 연구가 계속 이루어져오고 있다(Sibson, 1981; Rojstaczer et al., 1992; MuirWood and King, 1993).

지진에 의하여 (1) 지하수위 변동과 하천 수위 변화 (Montgomery and Manga, 2003; Gau et al., 2007), (2) 지하수 및 용천수의 수질 변화(Sato et al., 1995; Takamura and Kono, 1996; Ekemen Keskin, 2010), 그리고 (3)

지하수 및 하천 유출량 변화(Tokunaga, 1999) 등이 발생하는 것이 알려졌다.

지진에 의한 지하수위 변동과 관련한 연구는 지진발생 동시기(coseismic)와 지진발생 이후(postseismic)의 지하수위 변동에 대해서 많은 논문과 사례들이 보고되고 있다(Roeloffs, 1998; Wang et al., 2004; Caporali et al., 2005; Cutillo and Ge, 2006; Ohno et al., 2006; Gau et al., 2007; Ramana et al., 2007; Chia et al., 2008; Singh, 2008). 그러나, 지진발생 이전(preseismic)의 지하수위 변동에 관한 연구 및 사례들은 많지 않다(Koizumi et al., 2004; Chen et al., 2010; Chiu et al., 2010). 지하수위를 이용한 지진예보 가능성에 대하여는 대만에서 1999년

*Corresponding author : hsy@pusan.ac.kr, hasife@kigam.re.kr

원고접수일 : 2010. 11. 29 심사일 : 2011. 3. 28 게재승인일 : 2011. 4. 1
질의 및 토의 : 2011. 6. 30 까지

에 발생한 치치 지진(Chi-Chi earthquake)에 대하여는 지진 발생 이전의 지하수위를 분석하여 지하수위 관측자료를 이용한 지진예보 가능성을 제시하였으나, 수리지질여건에 따라 지하수위 변동이 상이할 뿐만 아니라, 지하수위 변동자료에서 지진과 관련한 부분만 추출해 내는 것도 어렵기 때문에 향후 지속적인 연구가 필요하다는 인식을 확산시키는데 그치고 있다(Gau et al., 2007).

이와 같이 국외에서는 지진과 지하수위의 관련성에 대한 연구는 1990년대부터 활발하게 진행되어 오고 있으나, 우리나라에서는 최근에 지하수를 이용한 지진과의 연관성을 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다. Hamm et al., (2009)과 옥순일 외(2010)은 2004년 인도네시아 수마트라 지진에 의한 제주도에서 지하수위 변화와 전기전도도(EC), 온도 그리고 수리적 특성에 관하여 논하였으며, Kim 외(2010)는 2008년에 약 2,000 km 떨어진 곳에서 발생한 중국 쓰촨성 지진에 의한 지하수위 변동, 온도, 그리고 전기전도도(EC) 변화에 관해서 발표한 바 있다.

본 연구는 규모 7.7의 2010년 6월 13일 발생한 인도네시아 수마트라 바다아체 서북서쪽 452 km 해역에서 일어난 지진에 의한 영향으로 제주도 지하수의 수위 변동 양상에 대한 연구이다. 제주도 지진관측소에서 관측된 2010년 6월 13일 인도네시아에서 발생한 지진의 영향으로 인한 지하수위 변동과 지하수의 온도 변화에 대해서 비교분석을 하였으며 또한, 각 관측공에서의 지하수위 변동 폭과 수리적 특성과의 연관성을 파악하였다. 옥순일 외(2010)에 의해 관측된 지하수위는 30분 내지 1시간간격으로 측정된 것으로 지진에 따른 지하수위 반응양상을 파악하기에는 다소 무리가 있기 때문에 이번 연구에서는 지하수위를 1분 간격으로 조밀하게 측정하였으며, 이는 수초 또는 수분 내에 측정되는 지진파와의 상관성을 파악하는데 유리할 것으로 판단된다.

2. 제주도의 수리지질

제주도는 신생대 제3기말~제4기에 수습 회에 걸친 화산분출로 이루어진 화산섬으로 동서길이가 약 74 km, 남북은 약 32 km의 타원형으로 면적은 약 1,829 km²이다. 제주도의 장축방향인 서쪽과 동쪽은 완만하며 단축방향인 북쪽과 남쪽은 험준한 형태를 이루며 약 360여개의 오름이 한라산 주변에 분포하고 있다.

화산분출에 의한 용암류들은 제주도에 수직·수평적으로 분포하고 있으며 용암분출에 의해서 형성된 화산암들과 화산쇄설암 그리고 용암류 사이에 분포하고 있는 퇴적

층이 겹겹이 나타나며 하부로부터 중생대 화강암과 용결 응회암, U층, 서귀포층 그리고 용암류로 이루어진 화산암이 분포하고 있다(윤선 외, 1995; 고기원, 1997; Yoon, 1997; 한국지질자원연구원, 2008).

제주도 지하수의 부존형태와 산출특성을 결정짓는데 매우 중요한 수문지질학적 방벽(hydrogeological barrier) 역할을 하고 있는 층으로는 응회암과 퇴적층(화산암괴, 자갈, 모래, 화산재 등이 고결 또는 준고결된 상태), 서귀포층(해양생물회석, 이암, 사암, 역암 등으로 구성) 그리고 퇴적층(용암류와 용암류 사이에 존재) 등은 다양한 심도에서 지하에 분포하여 지하수 부존과 유동을 규제하는 것으로 알려져 있다. 투수성 지질은 아아 용암류에 의해 형성된 클링커층, 냉각철리, 고결되지 않은 분석이나 스크리아(scoria), 파호이호이 용암류에 발달하는 용암관(lava tube) 또는 용암터널, 숨골(용암 터널의 붕괴에 의한 공동), 꽃자왈, 오름, 단열대, 파쇄대, 스패터, 용암류와 용암류 사이의 접촉면, 유리쇄설암(hyaloclastite), 화성쇄설퇴적층, 수직철리대 등이 있다(고기원, 1997, 2001; Won et al., 2006; 한국지질자원연구원, 2008). 따라서, 제주도의 수리지질은 용암분출에 의해 형성된 화산암류 등과 퇴적층 등으로 인해 투수성 지질매체와 저투수성 지질매체들이 반복적으로 쌓인 지역으로 대수층의 수리적 특성이 다양하게 나타나고 있다.

3. 지하수 관측과 분석

3.1. 지하수위 관측

본 연구에서는 제주특별자치도 환경자연연구원에서 관측하고 있는 지하수 관측망 및 해수침투 관측공, 또는 신규개발공 등을 대상으로 지진에 의한 지하수위 관측공으로 선정하였다. 제주도 지하수의 부존형태를 고려하여 해수침투지역에 위치하고 있는 HD1, SS1, TH1, YM1과 해수침입이 이루어지고 있지 않는 BJY2, HG1, SY1, HAM1, KS1, YS1호공을 선정하여 모니터링을 하였고, 또한 중산간지역의 수위변화를 관측하기 위해서 HD3, SS3, HC3호공을 선정하여 제주도 전역에 고루 분포시켜 지진에 의한 수위변동을 관측하고 있다(Fig. 1).

해안변에 위치한 관측공의 표고는 해발 6.24~33.8 m이며 굴착심도는 10.1~175 m, 그리고 지하수위는 해발 6.7~33.3 m에 분포하고 있고, 중산간지대에 위치한 관측공의 표고는 해발 87.4~115 m, 굴착심도는 186~267 m, 지하수위는 해발 84.7~113 m에 분포하고 있다(Table 1).

제주특별자치도 환경자연연구원에서 모니터링 중인 관

측공의 지하수위는 30분 간격으로 자동관측장치(In-Situ 사의 Troll 9000 series)를 사용하여 측정하고 있으나, 지

진에 따른 지하수위변동은 30분 이내의 시간 안에 발생할 가능성이 크기 때문에, 자동수위관측기(Diver)를 이용하여 1분단위로 수위 및 온도를 관측하였다. 또한, 지역적인 대기압의 영향이 다를 것으로 판단하여 4개 지역(SY1, SS3, YM1, KS1)에 Baro-diver를 설치하여 대기압을 보정하였다.

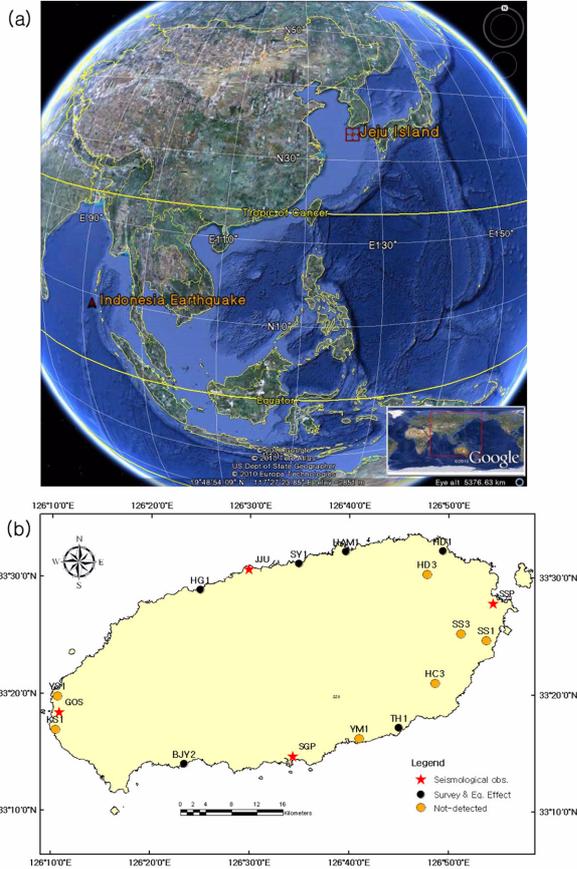


Fig. 1. Location of the epicenter (a), seismicological observatories and groundwater monitoring wells in Jeju Island (b).

3.2. 지진에 의한 지하수위 분석

본 연구에서 지하수위변동은 강우와 조석의 영향을 검토하기 위하여, 강우는 제주 지역 강우자료(기상청, 2010b)를 이용하였으며, 조석은 해양조사원(국립해양조사원, 2010)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 또한, 지진과 자료는 기상청 자료(기상청, 2010a)를 이용하였으며 데이터분석을 위해 한국지질자원연구원 지진연구센터의 analyst25를 프로그램을 사용하였다.

지진에 의한 지하수위 변동을 파악하기 위해서 Diver에서 측정된 값을 baro-diver로 대기압 보정을 하였으며 보정된 값은 이동 평균법(Moving Average Method)을 이용하여 지진에 의한 지하수위 변화를 추출하였다. 이동평균법으로 적용된 수식은 다음과 같다.

$$X_t^* = X_t - \frac{X_{t-n} + \dots + X_t + \dots + X_{t+n}}{2n+1} \tag{1}$$

여기서, X_t^* 는 이동평균법으로 얻은 값이며, X_t 는 t 시간에서의 측정된 값, n은 X_t 값 전후의 n 개의 수를 나타낸다. 본 연구에서의 이동평균법으로 지하수위를 나타내었을 때, 지하수위 이상 현상이 가장 잘 나타나는 n의 수를 1로 결정하여 수위변동 이상 현상을 관찰하였다.

Table 1. Groundwater monitoring well

Region	OW	Longitude	Latitude	Elevation (EL. m)	Well Depth (m)	GWL (EL.m)
East	SS1	126°53'45.55"	33°24'40.86"	33.8	151	32.9
	SS3	126°51'13.98"	33°25'14.23"	115.5	267	113.8
	HD1	126°49'24.58"	33°32'18.32"	15.4	175	13.5
	HD3	126°47'50.23"	33°30'19.85"	112.9	262	119.8
	HAM1	126°39'36.31"	33°32'15.31"	21.5	150	19.8
	HC3	126°48'36.98"	33°21'01.15"	87.5	186	85.3
West	KS1	126°10'26.12"	33°16'56.36"	8.9	146	8.6
	YS1	126°10'35.87"	33°19'46.22"	10.9	150	8.7
North	HG1	126°24'57.91"	33°28'56.06"	13.6	120	6.9
	SY1	126°34'52.11"	33°31'13.84"	10.5	130	8.9
South	YM1	126°41'00.97"	33°16'15.54"	22.2	160	20.5
	TH1	126°44'59.87"	33°17'12.19"	15.1	91	14.6
	BJY1	126°23'22.90"	33°14'15.89"	7.9	40.6	6.7

OW: Observation Well, EL: Elevation in mean sea level, GWL: Groundwater level

Table 2. Statistics of the observed earthquake in foreign countries from 25 May to 25 October, 2010

Statistics	Count (No.)	Max.	Min.	Arithmetic mean	Geometric mean	Median
Magnitude (Mw)	36	7.7	5.1	6.43	6.38	6.3
Distance from epicenter (km)	36	18,000	850	4,900	3,140	2,900

4. 지진에 의한 지하수위 변동 양상

4.1. 지진발생 현황

최근 국외에서는 다양한 규모의 지진이 발생하고 있으며 본 연구에서는 제주도에서 1분 간격으로 지하수위를 취득하기 시작한 2010년 5월 17일부터 국외에서 발생한 지진에 대한 현황을 살펴보았다. 기상청에서 제공하는 국외에서 2010년 5월 25일부터 2010년 10월 25일까지 발생한 지진을 분석한 결과, 규모 5.1 이상의 지진은 총 36회가 발생하였으며 지진의 규모는 5.1에서부터 7.7까지이다. 또한, 국외에서 발생한 지진의 진앙지와 제주도와와의 거리는 평균 약 4,900 km이며 최소 약 850 km(일본 혼슈 오사카 남남동쪽 57 km 지역)에서 최대 약 18,000 km(칠레 칼라마 동북동쪽 78 km 지역)이다(Table 2). 연구기간 중 발생한 지진 중 규모가 7.0 이상인 지진은 총 11회 발생하였으며, 이 중 규모가 7.7로 가장 큰 지진이 인도네시아에서 발생하였다. 특히, 인도네시아에서는 규모가 7.0 이상인 지진이 4회가 발생하여 큰 규모의 지진이 가장 많이 발생한 나라로 기록되었다.

동 기간 동안 국내에서 관측된 규모 2.0 이상의 지진은 17회 있었으며, 이 중 8월 28일 오전 7시 35분에 제주도 서귀포시 남남서쪽 45 km 해역에서 발생한 지진이 규모 3.2로 가장 큰 지진이었다.

본 연구에서는 연구기간 중에 발생한 지진 중 지진규모가 가장 크고 제주도에서 진앙지와와의 거리가 평균에 가까운 4,600 km 떨어진 규모 7.7의 인도네시아에서 발생한 지진에 대한 지하수위 변동을 분석하였다.

4.2. 지하수위 변동양상

2010년 6월 13일 오전 4시 26분(한국시간)에 인도네시아 수마트라 반다야체 서북서쪽 452 km 해역에서 발생한 규모 7.7의 지진(Fig. 1)은 약 4,600 km 떨어진 제주도 지진관측소(station ID: JJU)에 2010년 6월 13일 오전 4시 34분에 지진파가 관측되기 시작하였으며 지진파는 오전 4시 34분 31초부터 오전 5시 32분 13초까지 약 1시간정도 지속되었다(Fig. 2).

지진에 의한 지하수위 변동의 이상 현상을 조사하기 위해서는 선행강우에 의한 지하수위 상승, 대기압에 의한 영

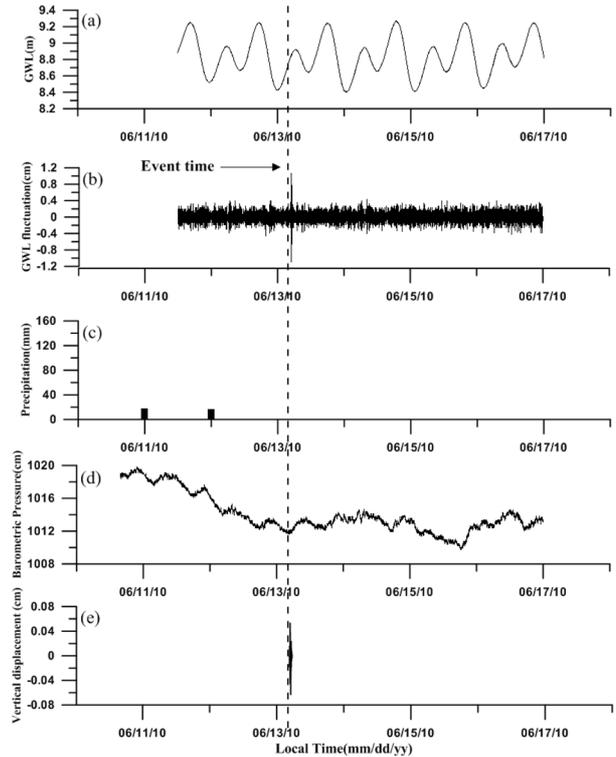


Fig. 2. Groundwater level (a) and groundwater level fluctuation (b), precipitation (c), and barometric pressure head (d) in SY1 well, with the Earthquake seismic data (e) in Jeju seismological observatory (JJU).

향 그리고 해안지역에서의 조석에 의한 영향 등을 검토하여야 한다(옥순일 외, 2010). 지진이 발생한 2010년 6월 제주도에서의 강수량은 188 mm이었지만, 지진 발생 6월 13일 이전 강수량은 약 33.5 mm를 기록하였다. 대기압은 4개의 관측공(SY1, SS3, YM1, KS1)에서 측정된 자료를 보정해 주었다.

옥순일 외(2010)는 2004년 인도네시아 수마트라 지진에 의한 수위변동은 순간적으로 발생하는 현상이므로 지하수위의 수위변동 이상값 식별이 가능하기 때문에 조석영향을 별도로 제거하지 않았다. 그러나, 금번에 조사된 관측 자료를 보면 조석의 영향 때문에 지하수위의 이상값 식별이 어려워 시계열 분석과정이 필요하였다. Fig. 2는 연구 지역에서 지하수위 이상 현상이 관측되었을 때 원 지하수위 변동, 이동평균법에 의해 경향성을 제거한 지하수위 변

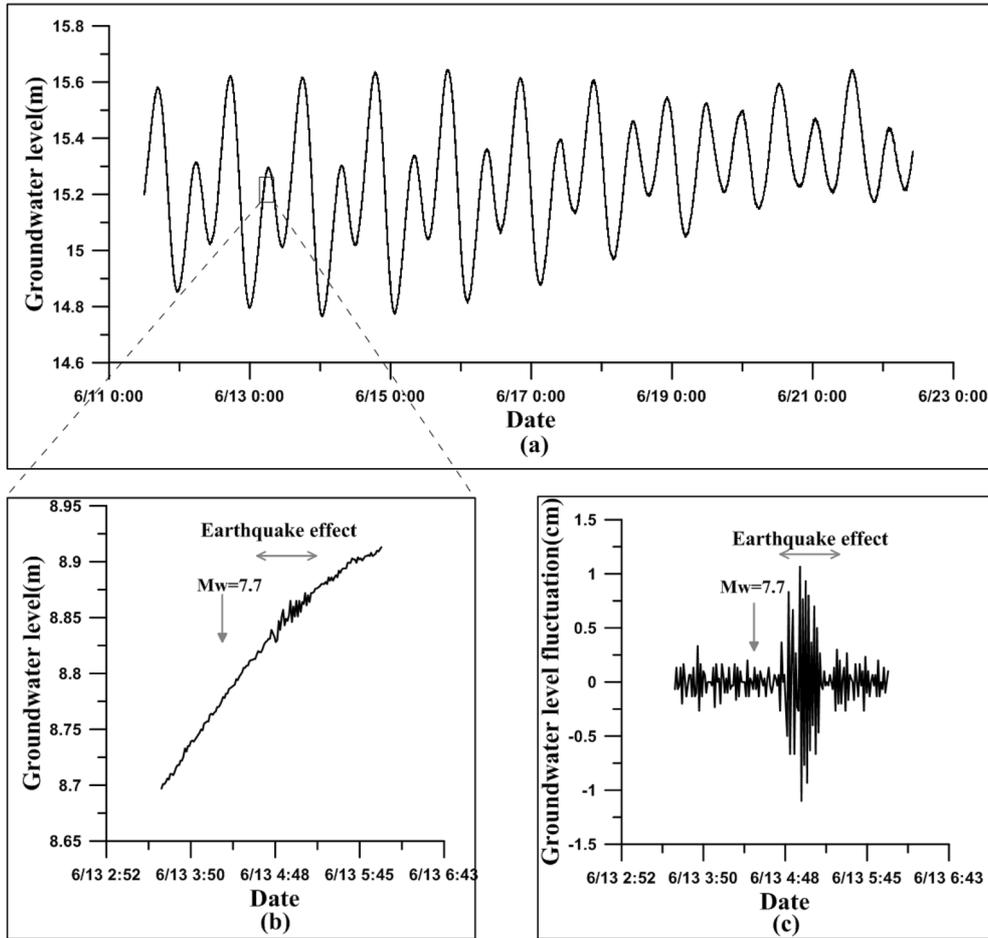


Fig. 3. Groundwater level change due to the earthquake in SY1 well, (a) groundwater level from June 11, 12:00 to June 22, 10:00, (b) groundwater level change, (c) groundwater level fluctuation by moving average filtering.

동, 그리고 지진파를 비교한 그래프이다. 삼양1호공의 지하수위는 Fig. 3(a)에서와 같이 조석의 영향을 받고 있으며 기존의 수위 그래프로 보서는 지하수위 이상 현상을 파악하기가 어렵다. 하지만 Fig. 3(b) 처럼 수위변동 간격을 줄이면 지진 발생 후 지하수위가 스크래치 형태를 나타내는 것을 알 수 있으며 이동 평균법을 적용하면 Fig. 3(c)처럼 지하수위가 지진파와 공조하여 변동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 2은 분석대상인 인도네시아 수마트라 반도아체 서북서쪽 452 km 해역에서 발생한 지진이 도달했을 것으로 추정되는 기간의 선후의 지하수위변동과 강우, 대기압, 조석 등의 효과를 비교한 그림이다. 원 지하수위변동자료에서는 조석의 효과가 우세하여 지진에 의한 효과를 식별하기 어렵지만, 앞서 기술한 이동평균법에 의하여 장기 경향성을 제거하면, 지진의 반응이 뚜렷하게 지하수위에 나타나는 것을 확인할 수 있다. 강우와의 연관성은 지진 발

생 이전에 2차례의 선행강우가 있었지만, 약 20 mm도 안 되는 적은 양이어서 현장여건상 강우의 함양이 발생하기 어려운 상황이며, 지하수위 변동양상 또한 통상적인 함양양상과는 달라서 강우의 함양과는 연관성이 없다고 판단하였다(Fig. 2). 대기압 그래프도 역시 지하수위 이상 현상이 발생했을 때 큰 변화가 없는 것이 확인되었다.

그러나, 지진파 자료를 보면, 지진파와 이동평균법으로 추출된 지하수위 변동 그래프를 보면 지하수위 변동이 바로 지진파 그래프와 같이 연관되어 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 지하수위 변동폭은 작지만 지진파에 의한 영향으로 인해서 지하수 관측공내의 작은 떨림 현상이 지하수위에 그대로 반영되어 나타나는 것으로 생각된다. 또한, 이러한 지진에 의한 지하수위의 변동폭은 지진 규모나 수리지질여건에 따라서 차이가 나는 것으로 판단된다(Hamm et al., 2009; 옥순일 외, 2010).

연구지역의 지하수위 변동 분석 결과, 중산간 지대에 설

Table 3. Hydraulic responses to the earthquake in the monitoring wells

Location	Observation Well	Earthquake response	Groundwater level change (cm)	Response time (min)	
Coastal area	HD1	○	2.4	27	
	Seawater intrusion	TH1	○	1.5	19
		SS1	×	-	-
		YM1	×	-	-
		HG1	○	1.5	18
	Freshwater	SY1	○	1.9	23
		HAM1	○	1.8	21
		BJY1	○	1.4	16
		KS1	×	-	-
YS1		×	-	-	
Mid-elevation area	SS3	×	-	-	
	HC3	×	-	-	
	HD3	×	-	-	

치된 관측공(SS3, HD3, HC3)에서는 지하수위 변동의 이상 현상이 관측되지 않았다. 해안변 지역에 위치한 10개 공들은 모두 조석의 영향을 받고 있는 관측공으로 이중 지진에 의한 지하수위 변동이 나타난 관측공은 6개공(SY1, HG1, HAM1, HD1, TH1, BJY1)이다(Table 3). 지진에 의한 지하수위 변동 현상이 나타난 6개공 중 4개공(HG1, HAM1, TH1, BJY1)은 해수침투가 발생하지 않는 관측공으로 지진파에 의한 수위변동은 반드시 해수 침투와 관련되어 발생하기 보다는 지하지질의 매질의 차이에서 반응이 나타나는 것으로 판단된다.

인도네시아 지진에 의한 지하수위 이상 현상이 관측된 6개의 모니터링 관측공에서는 지진파가 관측된 약 10분후인 오전 4시 45분부터 오전 5시 14분까지 16~27분 정도 지진에 의한 지하수위변동이 진동형태(oscillatory changes)로 나타났으며, 지하수위 변동폭은 1.4~2.4 cm의 범위를 나타내었다(Table 3, Fig. 4).

지진이 발생했을 때 지하수위 상승과 하강 양상은 지진에 의한 대수층의 압축과 팽창에서 기인하며, 대수층의 유형에 따라서 지진에 의해 지하수위가 상승 또는 하강한 후 본래의 지하수위로 회복되는 시간은 달라 지게 된다(Chia et al., 2008; Hamm et al., 2009; 옥순일 외, 2010). 지진에 의해 대수층이 압축되어 대수층 내 공극이 감소하면 지하수위가 상승하고, 대수층이 팽창되어 공극이 증가하면 지하수위가 하강하게 된다(Wakita, 1975; Grecksch et al., 1999; Brodsky et al., 2003; 옥순일 외, 2010).

제주특별자치도 환경자원연구원과 국가 지하수 관측망에서 관측하고 있는 30분내지 1시간 간격으로 관측된 데

이터에서는 1분 단위 관측데이터처럼 수위변동이 진동형태 또는 펄스 형태(pulse type)로 나타나지 않으며 30분 내지 1시간동안 하나의 자료밖에는 얻을 수 없기때문에, 지하수위 이상 현상과 지하수위 변동 시간 등 지진에 의한 지하수위 변동 양상을 파악하기는 어렵다고 판단된다(Hamm et al., 2009; 옥순일 외, 2010, Kim et al., 2010).

6개의 관측정외에 다른 관측공에서 지하수위 이상 현상이 관측되지 않은 이유는 지진파를 전달하는 관측공 내의 지하지질과 수리지질학적 특성 차이에 기인한 것으로 판단되며, 향후 더 많은 관측공 확보와 지하지질을 파악할 수 있는 시추주상도, 다양한 수리시험결과 자료를 통하여 지진과 지하수위 변동에 대한 메카니즘이 보다 명확해 질 것으로 판단된다.

5. 지진에 의한 지하수위 변동과 수리적 특성

연구지역의 관측공에 대한 수리적 특성을 파악하기 위해서 각 관측공의 양수량과 수위강하 자료를 이용하여 비양수량과, 투수량계수를 산정하였다. 최병수(1999)는 제주도에서 실시된 양수시험 자료를 자유면 대수층 모델(Cooper and Jacob, 1946)을 적용하였고, Hamm et al.(2005)은 Moench(1985)의 누수대수층 모델을 적용하여 투수량계수를 산정하였다. 본 연구에서는 연구지역 관측공이 대부분 해수침투 및 지하수 관측공으로 사용되고 있고, 굴착심도가 서귀포층 및 U층까지 굴착이 되었으므로 누수피압대수층 모델이 적합하다고 판단하여 Hamm et al.(2005)이 제시한 투수량계수(T)와 비양수량(Q/s)간의 관계식인

$$T = 0.99(Q/s)^{0.89} \quad (2)$$

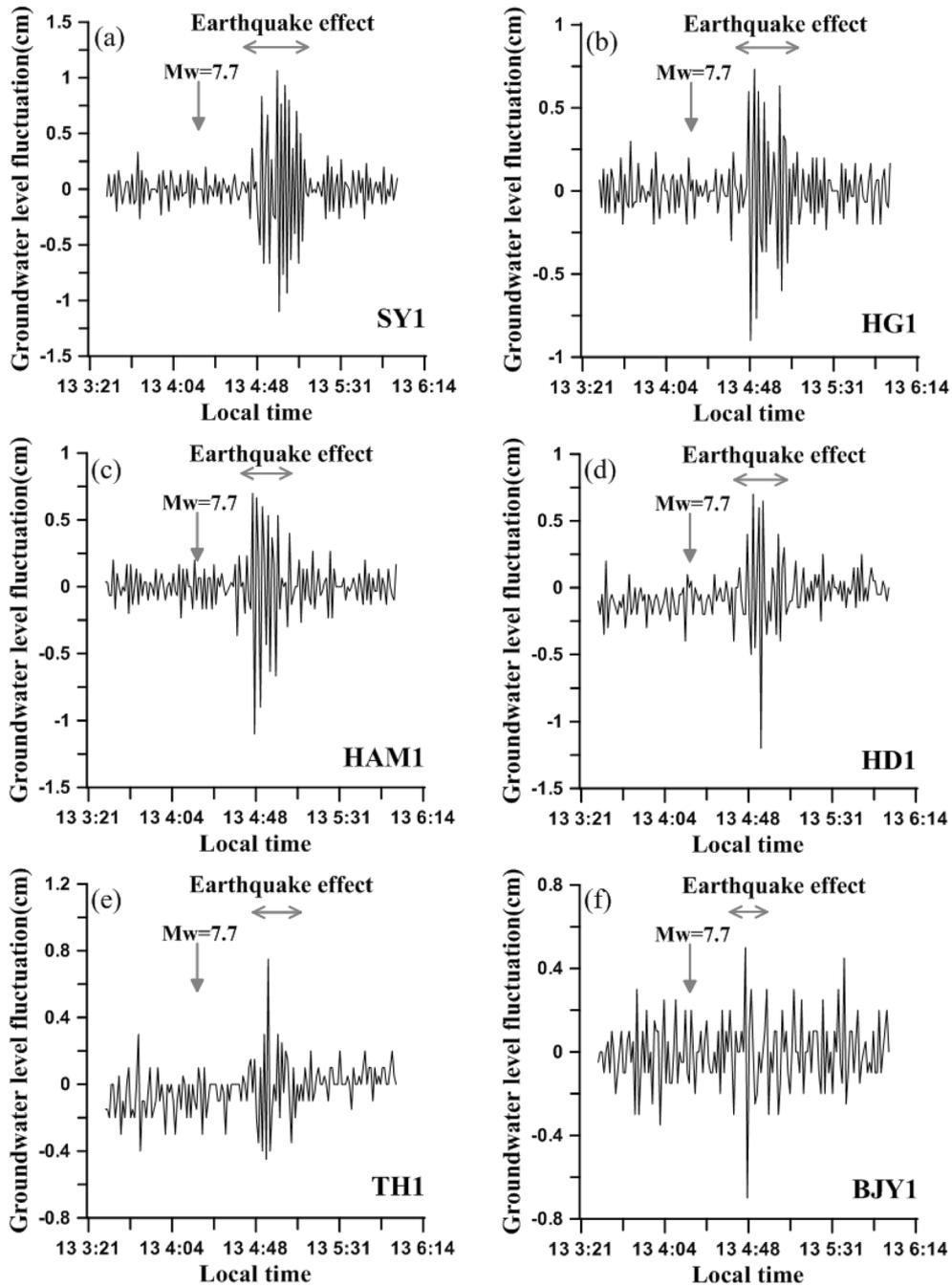


Fig. 4. Groundwater level fluctuation of monitoring wells in Jeju Island due to the Indonesia Earthquake: SY1 (a), HG1 (b), HAM (c), HD (d), TH (e), BGY (f).

으로부터 대수층의 투수량계수를 산정하였다.

위의 관계식으로부터 구한 관측공에서의 투수량계수는 3.14~8,700 m²/day의 넓은 분포를 보이는 것으로 나타났다. 이 중 지진의 영향을 받은 관측공의 투수량계수는 3.14~4,801 m²/day 범위를 나타내었으며, TH1공은 양수시험 자료와 양수량 및 수위강하 자료가 없어 투수량계수를

산정할 수 없었다. BGY1공의 수리상수는 양수시험 자료로부터 나온 값을 이용하였다(한국지질자원연구원, 2010, Table 4). 지진에 의한 지하수위 변동시간은 약 16~27분이며 투수량계수가 높을수록 지하수위가 변동하는 반응시간도 같이 높아지는 경향을 보이며, 식 (3)에 의해서 결정계수가 R²= 0.86로 높은 상관성을 나타내었다. 또한, 지

Table 4. Hydrogeologic characteristics of the monitoring wells

Location	OW	Distance from coast (km)	Specific capacity (m ² /day)	Transmissivity (m ² /day)	Aquifers (EL.m)
East	SS1	1.4	4,000	1,590	Pyroclastics (-46.9 ~ -57.9) Hyaloclastites (-101.6 ~ -105.)
	SS3	5.5	609	298	Pyroclastics (66.4 ~ 12.4) Pyroclastic (-28.6 ~ -31.6)
	HD1	0.9	13,842	4,801	Hyaloclastites (-35.5 ~ -43.5) Hyaloclastite (-68 ~ -137)
	HD3	5.2	27,000	8,700	Hyaloclastite (-44 ~ -50) Hyaloclastite (-66.5 ~ -73) Hyaloclastite (-120 ~ -125)
	HAM1	0.6	1,310	588	Scoria (-16.3 ~ -17.8) Pyroclastics (-20.8 ~ -25.8)
	HC3	3.8	11,200	3,975	Hyaloclastites (-20.9 ~ -32.9)
	West	KS1	0.5	1,812	4,634
YS1		0.9	4,366	1,719	Hyaloclastites (-32.9 ~ -38.4) Hyaloclastites (-54 ~ -60)
North	HG1	0.2	72.7	44.9	Clinker (-26.9 ~ -29.4) Sgf (-73.4 ~ -86.4)
	SY1	0.1	12,670	4,437	Clinker (-34.8 ~ -37.8) Clinker (-50.3 ~ -53.8)
South	YM1	0.4	10,000	3,594	Hyaloclastites (-21.8 ~ -35.8) Pyroclastics (-43.8 ~ -44.3)
	TH1	0.5			Pyroclastics (-54 ~ -60) Pyroclastics (-68 ~ -70.5)
	BJY1	0.1	6.67	3.42	Clinker (2.9 ~ -2.4) Peperite (-22.6 ~ -25.1)

SGF: Seogwipo formation

Groundwater monitoring wells responded to the Earthquake were marked with shadows.

진에 의한 지하수위 변화와 투수량계수와의 관계도 식 (4)에 의해 $R^2 = 0.76$ 로 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 5(a), (b)).

$$RT = 1.284 \ln(T) + 13.736 \quad (3)$$

$$GL = 0.110 \ln(T) + 1.177 \quad (4)$$

여기에서, RT는 반응시간(response time, min), T는 투수량계수(Transmissivity, m²/day), GL는 지하수위 변화(Groundwater level change, cm)이다.

지진에 의한 지하수위 변동폭과 투수량계수가 서로 비례하는 것은 관측공의 투수성과 수리적 흐름이 좋을수록 지진에 의해서 관측공 내의 수위 변화에 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 그러나, 대수층의 지하수위 변동은 투수량계수 뿐만이 아니라 저류계수에 의해서도 달라질 수 있기 때문에 저류계수와의 상관성도 같이 검토해

보아야 한다(Shih, 2009). 제주도에서는 저류계수를 산정하여 보고된 사례가 적고, 또한 저류계수를 산정하기도 어렵기 때문에 저류계수와 지진에 의한 지하수위 변동폭을 비교하는 것을 차후 연구로 남겨 놓는다.

지하수위 반응시간과 지하수위 변동폭에 대한 상관성을 분석하여 보면, 지하수위 반응시간과 변동폭은 서로 비례하는 것으로 나타났다. 이는 지하수위 변동 폭이 커질수록 관측공에서 지진파에 의해 받는 에너지가 크다는 것을 의미하며 변동폭이 커짐에 따라서 본래의 수위로 회복하는데 걸리는 시간 역시 커지기 때문으로 추정된다. 지하수위 변동폭과 반응시간과는 식(5)로 나타났고, 결정계수는 $R^2 = 0.96$ 로 높은 상관성을 나타내었다(Fig. 5(c)).

$$GF = 0.093 RT - 0.174 \quad (5)$$

여기서 GF는 지하수위 변동 폭(Groundwater level fluctuation, cm)이다.

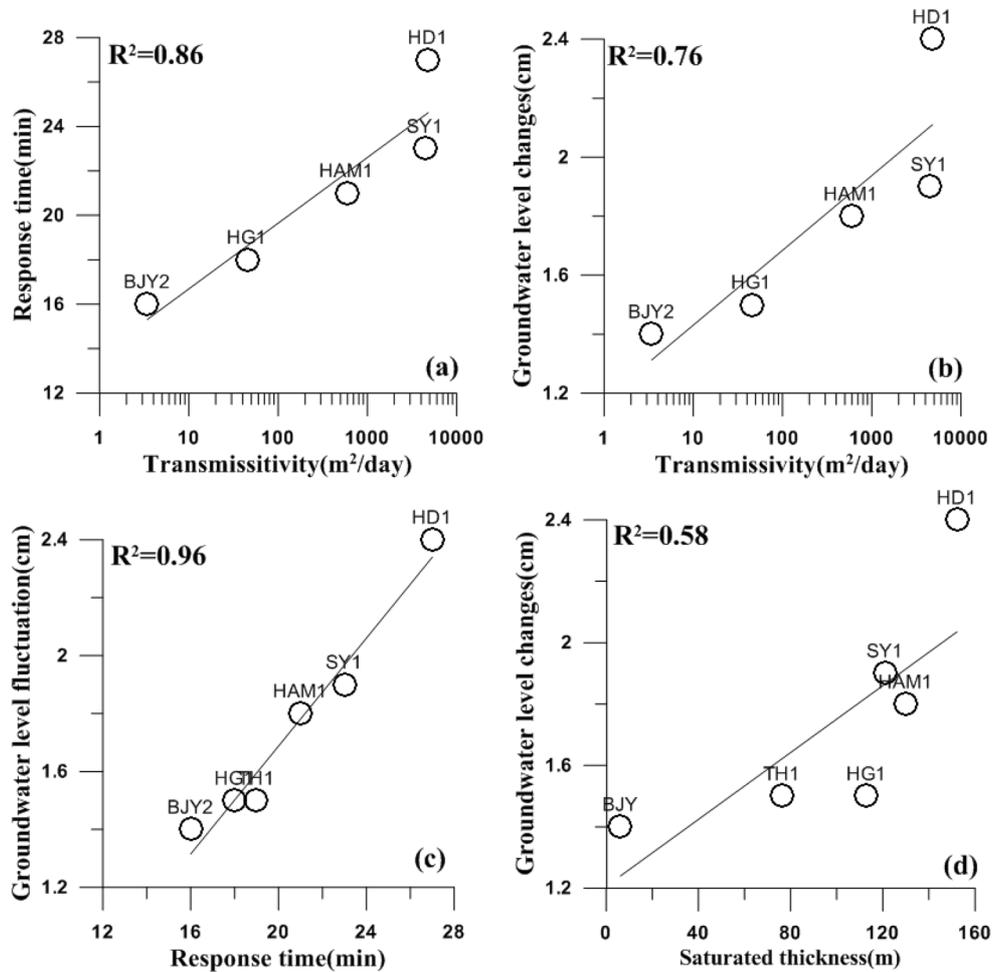


Fig. 5. Relationship between transmissivity vs response time (a), groundwater level fluctuation vs transmissivity (b), groundwater level fluctuation vs response time (c) and groundwater level fluctuation vs saturated thickness (d) due to the Earthquake.

지하수위 변동폭과 대수층의 포화대 두께(ST)와의 상관성은 대체적으로 포화대 두께가 커질수록 수위 변동 폭 또한 커지는 상관관계를 나타내었지만, 결정계수는 크지 않다(Fig. 5(d)).

$$GL = 0.0054 ST + 1.206 \quad (6)$$

여기서, ST는 포화대 두께(Saturated thickness, m)이다.

5. 요약 및 결론

2010년 6월 13일 오전 4시 26분(한국시간)에 인도네시아 수마트라 반도 서북서쪽 452 km 해역에서 일어난 지진에 의한 지진파가 제주도에 도달했을 때, 제주도에서 관측중인 지하수의 수위 변동을 분석한 결과 아래와 같이 요약할 수 있다.

(1) 인도네시아에서 발생한 지진은 약 4,600 km 떨어진 제주도에 국내시간(local time)으로 2010년 6월 13일 오전 4시 34분 31초에 지진파가 제주도에 도달하였으며 총 13개의 지하수 관측공 중 해안면에 위치하는 6개의 모니터링공(SY1, HG1, HAM1, HD1, TH1, BGY1)에서 지진에 의한 지하수위 이상 현상이 관측되었다. 지하수위 이상 현상이 관측된 6개의 모니터링 관측공에서는 약 11분 후인 오전 4시 45분부터 오전 5시 14분까지 16~27분 동안 지진에 의한 지하수위 변동이 진동형태로 나타났으며 지진에 의한 지하수위 변동폭은 1.4~2.4 cm의 범위를 나타내었다.

(2) 비양수량과 투수량계수 관계식으로부터 구한 관측공의 투수량계수는 3.14~8,700 m²/day이며, 지진의 영향을 받은 모니터링공의 투수량계수는 3.14~4,801 m²/day 범위를 나타내었다. 투수량계수와 지하수위 변동폭, 투수량계

수와 지하수위 반응시간은 높은 결정계수를 가진 양의 상관관계를 나타내었으며, 지하수위 변동폭과 지하수위 반응시간도 높은 상관성을 나타내었다. 이는 연구지역 관측공의 투수성과 수리적 흐름이 좋을수록 지진에 의해서 지하수위 변동도 크게 나타나고, 지하수위 변동폭이 클수록, 지하수위의 변동에 대한 회복도 더더지는 것으로 파악된다.

(3) 지진과 지하수와의 반응 메커니즘을 규명하는 연구는 지하수 시스템에 대한 수리지질학적인 이해뿐만 아니라, 지진예측 등에 활용할 수 있다. 지진에 대한 지하수위 변동은 대수층의 수리상수, 투수성 지질 등 수리지질학적인 요인에 의존하는바, 보다 명확한 메커니즘 규명을 위해서는 지하지질을 파악할 수 있는 시추주상도 확보 및 지하수 관측기술의 향상 등이 이루어져야 할 것이다. 또한, 관측공의 다양한 수리시험을 통한 저류계수, 수리전도도, 대수층두께 등을 파악하여 지진의 규모와 진앙지와의 거리에 의한 수위변화에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2010년 제주 광역경제권 선도사업 일환인 “제주위터 지속이용 기능량 평가 및 기능성 지하수 발굴”과제의 연구비지원에 의해서 시행되었으며, 지하수 관측공 선정과 지하수위 자료 취득에 도움을 주신 제주특별자치도 환경자원연구원 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 박사학위논문, p. 325.
 고기원, 2001, 하와이주의 수문지질과 지하수관리, 제주도 광역수자원관리본부, p. 313.
 국립해양조사원, 2010, 2010년 조석표, <http://www.khoa.go.kr>.
 기상청, 2010a, 2010년 국외 지진정보, <http://www.kma.go.kr/>.
 기상청, 2010b, 제주 기상연보, <http://www.kma.go.kr/>.
 옥순일, 함세영, 김봉상, 정재열, 우남철, 이수형, 고기원, 박윤석, 2010, 제주도 서부지역의 대수층 체계와 지진에 의한 지하수위 변동 특성, *자원환경지질*, **43**(4), 359-369.
 윤선, 고기원, 김인탁, 1995, 제주도 형성사, *제주도지*(98), 148-164 p.
 최병수, 1999, 제주도 지하수의 우물 비양구량자료를 이용한 대수층상수 결정방법, *지하수 환경*, **6**(4), 108-187.
 한국지질자원연구원, 2008, 제주도 지하수 부존 특성에 대한 지

구과학적 해석, p. 365.

한국지질자원연구원, 2010, 버자아제주리조트 예래 휴양형 주거단지 조성에 따른 용천수 영향조사, p. 187.

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.

Caporali, A., Braitenberg, C., and Massironi, M., 2005, Geotectonic and hydrological aspects of the Merano earthquake of 17 July 2001, *Journal of Geodynamics*, **39**, 317-336.

Chia, Y., Chiu, J.J., Chiang, Y-H., Lee T.P., and Lee, C-W., 2008, Spatial and Temporal Changes of Groundwater Level Induced by Thrust Faulting, *Pure appl. Geophys.*, (165), 5-16.

Chiu, F., Hsu, U., and Wang, C., 2010, Earthquake-induced Anomalous Groundwater Hydrologic Changes in Dor-Her station, Tawan, *AGU, West. Pac. Geophys.*

Chen, C., Wang, C., Chiu, F., Lia, W., Wang, C., Hsu, K., and Chia, Y., 2010, A large-scale groundwater level precursor associated with the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake, *AGU, West. Pac. Geophys.*

Cooper, H.H. and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Am. Geophys. Union Trans.*, **27**, 526-534.

Cuttillo, P.A. and Ge, S., 2006, Analysis of strain-induced groundwater fluctuations at Devils Hole, Nevada, *Geofluids*, **6**, 319-333.

Gau, H-S., Chen, T-C., Chen J-S., and Liu, C-W., 2007, Time series decomposition of groundwater level changes in wells due to the Chi-Chi earthquake in Taiwan: a possible hydrological precursor to earthquakes, *Hydrological Processes*, **21**, 510-524.

Grecksch, G., Roth, F., and Kumple, H.J., 1999, Coseismic well level changes due to the 1992 Roermond earthquake compared with static deformation of half space solutions, *Geophysical Journal International*, **138**, 470-478.

Ekemen Keskin, T., 2010, Groundwater changes in relation to seismic activity: a case study from Eskipazar (Karabuk, Turkey). *Hydrogeology Journal*, **10**, 1007.

Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Jang, S., Jung, C.-Y., and Kim, B.-S., 2005, Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea, *Journal of Hydrology*, **310**, 111-121.

Hamm, S.-Y., Lee, S.-H., Park, Y.-S., Koh, K.-W., Cheong, J.-Y. and Lee, J.-H., 2009, Relationship between earthquake and groundwater change observed in Jeju Island, Korea, *Asia Oceania Geosciences Society(AOGS) 6th Annual Meeting*, Singapore, 110.

Kim, M., Lee, H., and Woo, N.C., 2010, Changes in groundwa-

- ter level, temperature and EC due to Sichuan earthquake (M7.8) in Korea National Groundwater Monitoring Network, AGU, West. Pac. Geophys.
- Koizumi, N., Kitagawai, Y., Matsumoto, N., Takahashi, M., Sato, T., Kamigaich, O., and Nakamura, K., 2004, Pre-seismic groundwater level changes induced by crustal deformations related to earthquake swarms off the east coast of Izu Peninsula, Japan, *Geophysical Research Letters*, **31**, L10606.
- Moench, A.F., 1985, Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storage semiconfining layers, *Water Resources Research*, **21**, 1121-1131.
- Montgomery, D.R. and Manga, M., 2003, Streamflow and water well responses to earthquakes, *Science*, **300**, 2047-2049.
- Muir-Wood, R. and King, G.C.P., 1993, Hydrological signature of earthquake strain, *Journal of Geophysical Research*, **98**(22), 035-068.
- 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**, 647-655.
- 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**, 585-592.
- Roeloffs, E.A., 1998, Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquake, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 869-889.
- Rojstaczer, S., Wolf, S., and Michel, R., 1992, Permeability enhancement in the shallow crust as a cause of earthquake induced hydrological changes, *Nature* **373**, 237-239.
- Sato, T., Takahashi, M., Matsumoto, N., and Tsukuda, E., 1995, Anomalous ground water discharge after the 1995 kobe(Hyogo-ken-nanbu) earthquake in the Awaji island, Japan, *Chishitsu News* (496), 61-66.
- Sibson, R.H., 1981, Fluid flow accompaning faulting: Field evidence and models. In: Simpson, D.W., Richards, P.G. (Eds.). *Earthquake Prediction, American Geophysical Maurice Ewing Series*, **4**, 593-603.
- 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**, 58-62.
- Shih, D.C-F., 2009, Storage in confined aquifer: Spectral analysis of groundwater response to seismic Rayleigh waves, *Journal of Hydrology*, **374**, 83-91.
- Takamura, H. and Kono, T., 1996, Trend of spring water and groundwater in the Awaji Island after the 1995 Hyogo-nanbu earthquake. *Journal of Groundwater Hydrology*, **38**, 331-338.
- Tokunaga, T., 1999, Modeling of earthquake-induced hydrological changes and possible permeability enhancement due to the 17 January 1995 Kobe Earthquake, *Japan, Journal of Hydrology* **223**, 221-229.
- Wakita, H., 1975, Water wells as possible indicators of tectonic strain, *Science*, **189**, 553-555.
- Wang, C.Y., Wang, C.H., and Kuo, C.H., 2004, Temporal changes in groundwater level following the 1999 (Mw = 7.5) Chi-Chi earthquake, Taiwan, *Geofluids*, **4**, 210-220.
- Won, J.-H., Lee, J.-Y., Kim, J.-W., and Koh, G.-W., 2006, Groundwater occurrence on Jeju Island, Korea, *Hydrogeology Journal*, **14**, 532-547.
- Yoon, S., 1997, Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea, *Tectonophysics*, **281**, 53-70.