



2017 포항 지진시 단기간 지하수위 변동 및 하천 유량 변화 특성

최명락 · 이호정 · 김규범[‡]
 대전대학교 건설안전방재공학과

요 약

2017년 11월 15일 한반도 남동부에서 본진 규모 5.4의 포항지진이 발생하였다. 해당 지역내 6개 지하수 관측정에서 측정된 5분 간격의 지하수위 자료 및 형산강내 4개소의 하천 수위 및 유량 자료를 이용하여 지진시의 특성을 분석하였다. 본진 발생시 4개 관측정에서 단기간내 지하수위 하강, 1개 관측정은 상승 특성을 보였으며, 수위 변동 폭은 최대 42.0 cm에 이르렀다. 특히, 진앙에 가까운 2개 관측정에서는 지하수위 하강 후 지속적으로 유지되는 특성이 나타났다. 지진 규모 및 진앙까지 거리와 지하수위 변동량은 상관성이 매우 낮은 것으로 분석되었는데, 이는 매질의 불균질성 및 미고결층의 분포 등이 영향을 미치는 것으로 보인다. 지진시 파쇄대 투수성 및 지하수위 변화는 종종 하천 유량 변화를 야기하는 것으로 알려져 있는데, 연구지역내 형산강의 수위는 지진 직후 하강하였으며 재상승 이후에는 보다 완만한 하강 추세를 유지한 것으로 나타났으며, 상승 기간 동안에 배출된 하천 총 유량은 상류의 S1 지점에서 12,096 m³, 하류인 S4 지점에서 116,640 m³으로 나타났다.

주요어: 지진, 지하수위, 하천 유량

Myoung-Rak Choi, Ho-Jeong Lee and Gyoo-Bum Kim, 2018, Characteristics of short term changes of groundwater level and stream flow rate during 2017 Pohang earthquakes. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 5, p. 557-566

ABSTRACT: Pohang earthquake (Main shock magnitude = 5.4) occurred in Southeastern region of South Korea in November 15, 2017. Groundwater levels of 6 monitoring wells with 5 minutes interval measurements located in that region and stream water levels of 4 stations located along the Hyeongsan-gang stream are used for the analysis of earthquake induced effects. Four groundwater monitoring wells show a short-term decrease of groundwater level after a main shock and one well does an increase and the maximum change is about 42.0 cm. Especially, groundwater levels at two monitoring wells near the epicenter are consistently maintained after a decrease. There is little relationship between earthquake magnitude or a distance to epicenter and changing amount of groundwater level and it may be due to the inhomogeneity of geologic material and unconsolidated sediments distribution. The changes in permeability of fractured zone and groundwater levels occasionally cause changes in stream flow rate, and water level of the Hyeongsan-gang stream in the study area decreases just after the earthquake and increases again up to the normal level and next shows a more gentle decreasing slope. Total increasing flow rates at S1 (upstream site) and S4 (downstream site) stations are about 12,096 m³ and 116,640 m³, respectively, during the increasing period.

Key words: earthquake, groundwater level, stream flow rate

(Myoung-Rak Choi, Ho-Jeong Lee and Gyoo-Bum Kim, Department of Construction Safety and Disaster Prevention, Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea)

1. 서 언

최근 세계적인 지진 및 지하수 계측의 증가, 계측 기기의 발달 등과 더불어 지진 발생시 수반되는 지하수위 변화에 대한 많은 연구들이 수행된 바 있다

(Wang *et al.*, 2004a, 2015; Lai *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2013; Wang and Manga, 2014; Yan *et al.*, 2014, 2016; Shi *et al.*, 2015). 우리나라에서도 최근 수년간 큰 규모의 지진이 발생하면서 지진 메커니즘, 액상화, 지하수 변동, 지형 변형 등에 대한 다양한 연구들

[‡] Corresponding author: +82-42-280-4804, E-mail: geowater@dju.kr

이 수행되고 있다.

최근의 지진시 지하수 변동에 대한 연구 사례를 보면, 1989년 타이완의 Chi-Chi 지진(M = 7.5)시 연구에 의하면 지진에 수반되어 지하수위가 지수 함수적으로 증가 또는 감소하는 것으로 해석된 바 있으며(Wang *et al.*, 2004b), 지진시 지하수위의 변동 범위를 토대로 지진의 응력 영향권 해석에 대한 연구가 수행된 바 있다(Wang *et al.*, 2015). Wenchuan 지진(M = 8.0)시에는 중국 전역의 197개소 지하수 관측점으로부터 3가지의 지하수위 변동 유형(Co-seismic oscillations, Co-seismic step changes, Gradual post-seismic changes)이 분류된 바 있으며, 진원으로부터 거리, 암석 특성과 수위 변동 규모는 광역적으로는 상관성이 낮은 것으로 평가된 바 있다(Shi *et al.*, 2015). 2011년 Tohoku 지진(M = 9.0)시 일부 피압 대수층 지역에서 지진 발생 이전에 지하수위 및 수온 변화가 발생하였다는 연구 결과를 토대로 대규모 지진의 예측을 위한 피압대수층에서의 지하수 관측의 필요성을 제시하기도 하였다(Orihara *et al.*, 2014). 국내의 경우 2016년 9월 경주 지진시 1시간 간격의 지하수위 관측자료를 활용하여 지진 이후에 나타난 지하수위 변동 유형과 그 특성을 평가한 바 있다(Kim *et al.*, 2018).

또한, 지진시 하천 유량의 변화도 연구된 바 있는데, 미국 캘리포니아의 Sespe creek에서 지진 이후 증가된 하천의 유량은 연속된 지진에 의한 동적 변형이 기저 유출을 변화시킴으로써 대수층내 공극압의 변화를 야기하여 발생된다고 밝힌 바 있으며(Manga *et al.*, 2003), 대만의 Chi-Chi 지진(M = 7.6)시 22개 하천 수위 관측소에서 지진 이후 약 2~3 일간에 걸쳐 유량 증가가 발생하였으며 이 때의 감쇠 특성에 대한 연구를 수행한 바 있다(Liu *et al.*, 2018). 또한, 칠레의 Maule 지진(M = 8.8)시 78개 하천 수위 관측소에서 1.1 km³ 이상의 유량 증가가 발생한 바 있으며 이는 동적 변형에 의한 수직 수리전도도의 변화에 의한 것으로 평가된 바 있다(Mohr *et al.*, 2012; Mohr *et al.*, 2017).

2017년 11월 15일 포항지진은 포항시 흥해읍 남송리 일대에서 14시 29분에 M 5.4의 본진이 지하 약 4 km에서 발생하였는데, 단층면해 분석 결과 북동-남서 방향의 역단층성 우수향 주향이동단층에 의한 것으로 해석되었다. 이후 지하 3~7 km 하부에서 1,350회

이상의 여진이 수반되었으며, 대표적으로 16시 49분에 M 4.3, 11월 16일 09시 02분에 M 3.6, 11월 19일 23시 45분에 M 3.5, 11월 20일 06시 05분에 M 3.6, 12월 25일 16시 19분에 M 3.5, 2018년 02월 11일 05시 03분에 M 4.6의 여진이 나타났으며 대부분 주향이동단층에 의한 것으로 알려져 있다(KIGAM, 2018).

본 연구는 2017년 11월에 발생한 포항지진시 주변에 위치한 지하수 관측정에서의 지진 직후 지하수위의 변동과 형산강의 하천 유량 변화 특성을 파악하는데 목적을 두었다.

2. 연구 지역

연구지역은 한반도 동남부로서 경주, 포항 및 울산 일대를 포함하고 있으며, 대표적으로 양산단층, 밀양단층, 동래단층, 모량단층, 일광단층 및 울산단층 등이 분포하고 있으며, 이와 교차하면서 다양한 규모의 제4기 단층이 보고되고 있는 지역이다(그림 1). 경주지역은 이와 같은 단층을 따라 북북동~남남동 방향의 계곡이 발달되어 있으며 산지지형으로 둘러싸여 있는 반면에, 포항지역은 형산강 하류에 층적 분지가 발달하고 있다. 경주 및 포항 지역은 주로 화성암 및 화산암류가 발달하며 중생대 백악기의 퇴적암류를 관입하고 있고, 신생대 제3기의 퇴적암류, 화산암류 및 화성암류가 분포한다(그림 1).

3. 관측 현황

연구지역에 설치 운영 중인 12개 국가지하수관측정 중에서 6개 지점을 대상으로 2017년 10월 12일부터 Diver를 설치하여 5분 간격으로 지하수위를 측정하였다(표 1). 지하수위 변동에 영향을 미치는 강우의 파악을 위하여 주변의 기상청 및 국토교통부에서 관리하는 11개소 기상 관측 자료를 검토하였으며, 형산강 하천 수위는 5개소(상류로부터 S1(경주 2), S2(모아), S3(안강), S4(부조), S5(포항) 관측소)의 자료를 활용하였다(그림 1a).

4. 지하수위 변동 특성

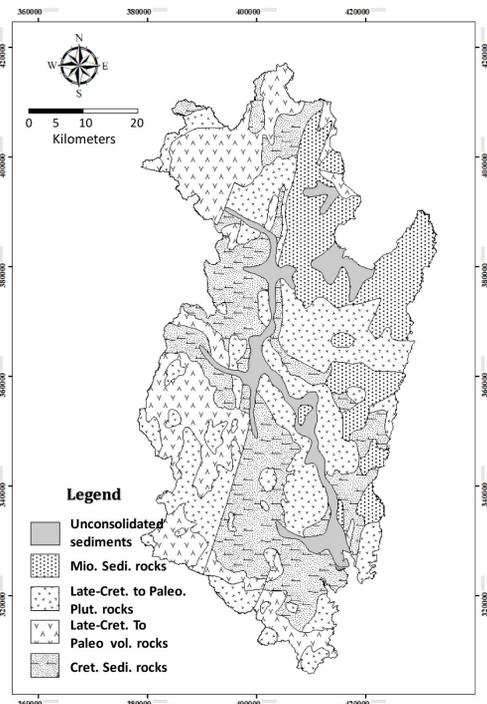
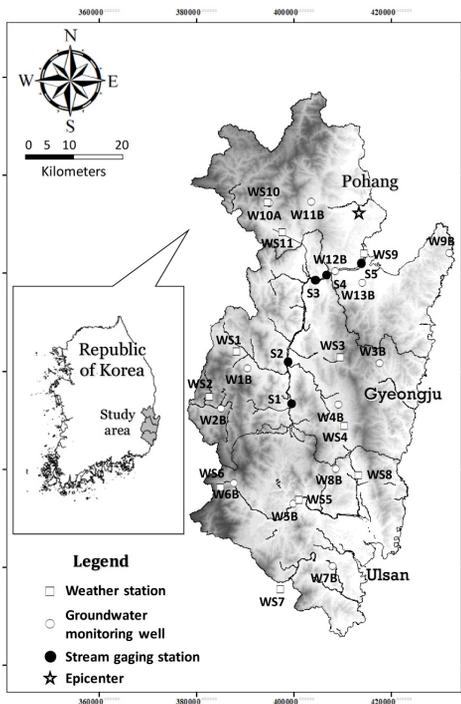
포항 본진 전후로 약 한 달 동안에는 강우가 거의 없었으므로, 지하수위의 변화는 주변에서의 양수 등

인위적인 요인 또는 지진 및 조위 영향에 의한 것으로 고려될 수 있다. 6개 지하수위 관측 지점은 큰 하천이나 양수정이 인접하지 않은 곳으로서, 본진 진 후 약 한 달 동안의 지하수위 변동을 보면 W2B의 경

우에는 산지로 둘러싸인 분지내에 위치하며 무강우 시의 지하수 배출 특성에 의한 지하수위 하강 패턴을 일부 보이고 있으나 나머지 관측 지점은 주변 양수 영향이 없는 일정한 지하수위 유지 특성을 보이

Table 1. List of groundwater monitoring wells in the study area (Revised from Kim *et al.*, 2018).

Well	X	Y	Depth (m)	Diameter (mm)	k (m/d)	Elevation (El.m)	Alluvial thickness (m)	Diver installation	Distance to epicenter (m)
W1B	390469	260590	70	200	9.926×10^{-6}	89.09	10.0	○	38,971
W2B	385149	252390	65	200	5.321×10^{-5}	200.04	5.8	○	48,695
W3B	417693	261617	73	150	1.780×10^{-4}	136.22	-	×	31,613
W4B	409218	253173	98	150	5.821×10^{-6}	96.80	-	×	39,698
W5B	399885	232973	79	200	9.240×10^{-5}	23.76	9.8	×	61,011
W6B	387811	237194	60	200	3.961×10^{-6}	198.56	5.8	×	60,700
W7B	407961	220208	70	200	4.518×10^{-4}	12.32	2.8	×	72,587
W8B	408715	240042	70	200	2.198×10^{-5}	57.80	2.4	○	52,785
W9B	431973	284087	70	200	1.176×10^{-5}	41.60	7.1	×	21,663
W11B	403662	294553	79	200	1.396×10^{-5}	82.38	2.5	○	17,941
W12B	408536	280413	70	200	5.050×10^{-3}	5.89	2.5	○	9,808
W13B	414057	278096	50	200	1.510×10^{-4}	28.73	2.6	○	13,355



(a) Location of the study area

(b) Geologic map

Fig. 1. (a) Location of the study area and (b) geologic map.

고 있다(그림 2). 그림에서 보듯이 규모가 큰 지진의 발생 시기에 순간적인 또는 지속적인 지하수위 변화 특성이 일부 관측정에서 나타나고 있다.

지진 직후의 단기간의 지하수위 변동 특성을 분석해 보면, W1B에서는 본진(14시 29분) 발생 직후인 14시 30분에 지하수위의 순간적인 상승(약 21.3 cm)이 측정된 후 원래대로 회복되었으며, 특히하게 11월 16일 14시 04분의 규모 2.3의 여진에 지하수위 하강(약 19.0 cm)이 발생한 후 회복되었고, 이후 여진에 의하여 매우 완만한 형태의 지하수위 상승이 나타났다(그림 3). W2B는 본진 직후 14시 30분에 약 42.0 cm의 지하수위 강하가 나타났으며 이후 여진 시에는 완만한 수위 상승이 수반된 후 18일부터 하강 패턴으로 변화되었다. W7B는 본진 및 여진에 따른 수위 변화가 거의 나타나지 않았다. W8B는 본진 직후인 14시 30분에 약 7.1 cm의 수위 강하가 측정되었으며, 즉시 회복된 이후 16시 49분의 여진(M = 4.3)의 영향으로 16시 50분에 약 2.1 cm의 수위 상승이 발생한 것으로 측정되었다. W11B는 본진 직후인 14시 30분에 약 17.1 cm의 순간적인 지하수위 하강이 관측되었으며 이후 지속적인 하강을 보인다. 16시 49분(M = 4.3) 여진시 16시 50분 측정 자료에 의하면 순간적으로 35.2 cm의 상승이 나타났다. W13B는 지진시 순간적인 수위 변화가 뚜렷하진 않으나 계속되는 여진으로 인하여 약 7.7 cm의 수위 강하가 15일 밤까지 지속되었으며 이후 안정한 값을 유지하

고 있다(그림 3).

한편, Wang (2007)은 각 관측 지점에서 지진의 에너지 밀도에 대한 다음 경험식을 제시한 바 있다.

$$\log e = 1.5M - 3.0 \log r - 4.2$$

여기에서, e 는 에너지 밀도 (J/m^3), M 은 지진의 규모, r 은 거리(km)를 의미한다. 이 식을 토대로 규모 3.0 이상의 주요 지진을 대상으로 각 관측정에서의 에너지 밀도를 산정하였다(표 2). 최대 지진 규모인 본진 발생시 진앙에 가까운 W11B는 약 $8.42 J/m^3$ 의 값을 보이고 있어 근거리 지진 영역($\sim 10 J/m^3$ 정도로서 단층 파쇄 길이에 상응하는 진앙으로부터의 거리, near field)에 근접하는 지역이며 기타 관측 지점은 원거리 지진(far field) 영역으로서 낮은 에너지 밀도를 보이고 있다. W11B의 지진 직후 지하수위 변동 양상은 대만의 Chi-Chi 지진(M=7.5)시 보여주었던 근거리 지진 영역에서 나타난 지하수위 변동 패턴과 유사한 양상(급하강 및 급상승후 지수적 변동)을 보이고 있어 상기 에너지 밀도 산정의 해석 결과와 유사하다(Wang and Chia, 2008). 또한, Wang *et al.* (2004a)가 제시한 지진 직후의 지하수위 변화 패턴(Type 3: 지수함수적인 수위 회복 특성으로서 지진에 의하여 하강한 후 지속 하강이 발생하는 Down-Down 형태)과 잘 일치하고 있는데, 그 원인이 지진 시 균열대 투수성의 증가로 인한 지하수 배출에 의

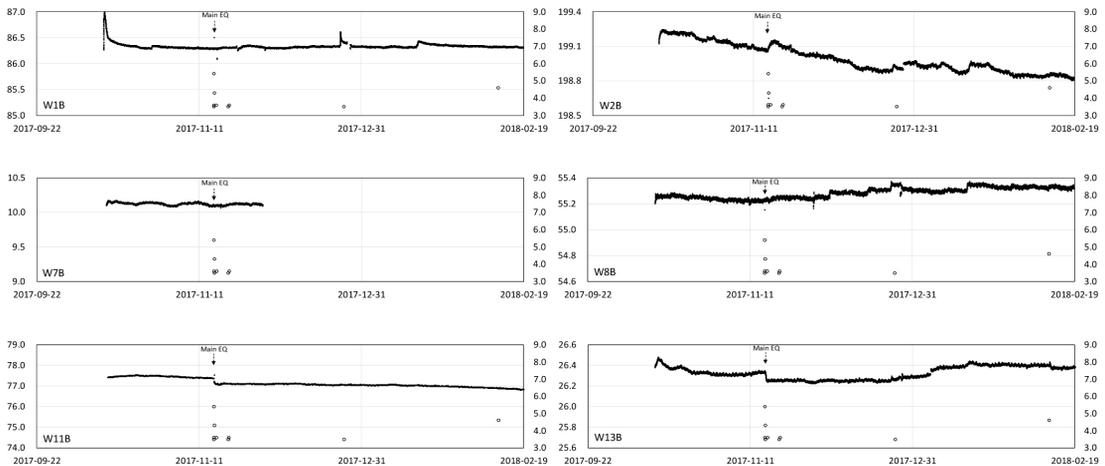


Fig. 2. Long term time series of groundwater level during Pohang earthquakes (black point: groundwater level, open circle: earthquakes (> M 3.0), x axis: date (yyyy-mm-dd), y axis: groundwater level (El.m)).

한 수위 변동이라는 해석으로 설명이 되고 있다.

W13B의 경우에는, 근거리 지진 영역에서 벗어나 있지만, 지진 이후 장기간의 낮은 지하수위 유지 특

성이 나타나고 있어 미고결층의 팽창에 의한 지하수위 하강(Wang *et al.*, 2001) 또는 암반 파쇄대내 클로킹 물질 제거 또는 파쇄대 확장에 의한 투수성 증가에

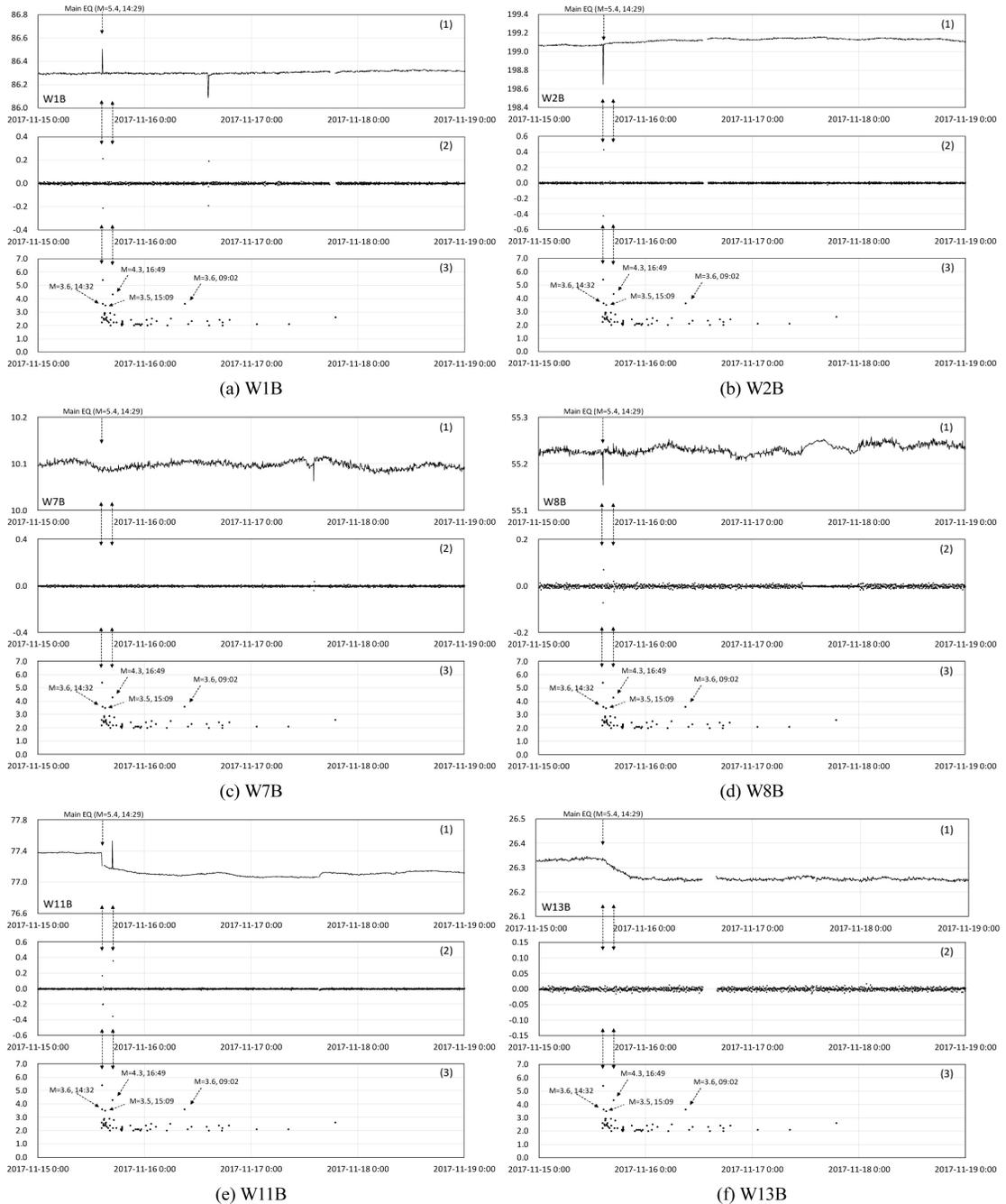


Fig. 3. (1) Time series of groundwater levels (x axis: time, y axis: water level (El.m)), (2) changes of groundwater levels (y axis: difference of water levels between 5 minute intervals (m), $\text{difference} = \text{water level}_{i+1} - \text{water level}_i$), and (3) earthquakes at 6 monitoring wells from November 15 to 18 (y axis: earthquake magnitude).

기인한 지하수위 하강(Rojstaczer *et al.*, 1995; Wiesner, 1999)에서 원인을 검토할 수 있으나, 전자의 경우 본 지점의 층적층이 매우 얇아 가능성이 낮으며, 후자의 파쇄대의 변화에 의한 것으로 그 기작을 추정할 수 있다. 기존 연구에 의하면 $\sim 10^{-4} \text{ J/m}^3$ 의 낮은 에너지 밀도에서도 지진은 파쇄대내의 점토 물질을 제거하여 투수성을 증대시키는 것으로 연구된 바 있다 (Coussot, 1995).

한편, 근거리 지진 영역을 벗어난 원거리 지진 영역에서는 장기간 동안의 지속적인 지하수위 변화 또는 영구적인 변화의 특성을 보인다고 연구된 바 있는데(Brodsky *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2009), W1B 및 W2B의 경우에 상대적으로 층적층이 두껍고 미고결층의 압축작용에 의하여 미세한 지하수위 상승(cm 규모)이 수 일 이상 유지되는 것으로 보인다(그림 2, 3).

W1B, W2B, W8B 등 3개 관측소의 본진 직후의 지하수위 변화를 보면, 본진 직후에 상승 또는 하강을 하였으며 이후 수 분 내에 동일한 수위 변화 규모로 하강 및 상승하여 원래대로 회복되는 특성을 보이고 있다(그림 3, 4). 이와 같은 변화는 14시 29분 본진 이후 변화된 수위가 14시 32분의 여진에 의하여 추가적인 응력에 의하여 수위가 변화되었다고 보기 보다는 본진 시 변화된 수위가 지반의 탄성 변형 이후 원래대로 회복되는 과정에 의하여 수위가 변화된 것으로 보인다. 이는 14시 35분에 측정된 지하수위 변화량은 본진에 의한 지하수위 변화량과 거의 동일하다는 점에서 추정해 볼 수 있다. 또한, 6개 지하수 관측소에서 동일 시간대의 지하수위 변화를 보면 본진시 일단 상승(또는 하강) 한 이후에 14시 32분의 여진에 의하여 추가로 상승(또는 하강)되는 현상을 보이지는 않는다.

Table 2. Estimaion of energy density corresponding to each earthquake magnitude at groundwater monitoring wells. (unit: J/m^3).

Earthquakes	W1B	W2B	W7B	W8B	W11B	W13B
5.4 (11/15, 14:29)	0.1342	0.0688	0.0208	0.0540	8.4195	2.3181
3.6 (11/15, 14:32)	0.0003	0.0001	0.0000	0.0001	0.0168	0.0046
3.5 (11/15, 15:09)	0.0002	0.0001	0.0000	0.0001	0.0119	0.0033
4.3 (11/15, 16:49)	0.0029	0.0015	0.0005	0.0012	0.1374	0.0476
3.6 (11/16, 09:02)	0.0002	0.0001	0.00004	0.0001	0.0112	0.0045

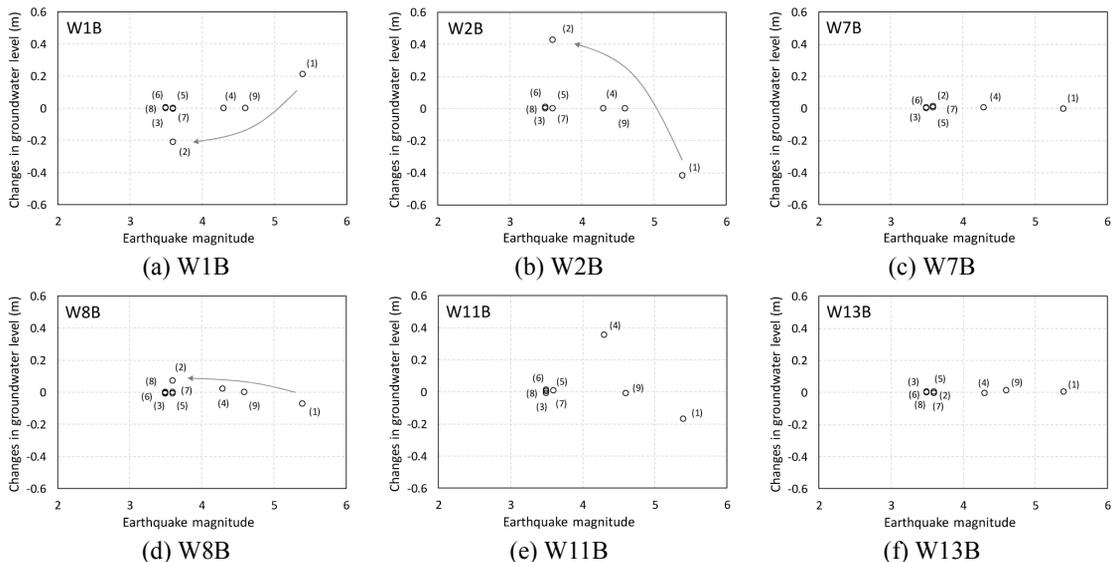


Fig. 4. Relationship between earthquake magnitude and changes in groundwater levels ((1) 11/15, 14:29, (2) 11/15, 14:32, (3) 11/15, 15:09, (4) 11/15, 16:49, (5) 11/16, 09:02, (6) 11/19, 23:45, (7) 11/20, 06:05, (8) 12/25, 16:19, (9) 2018/02/11, 05:03).

14시 35분 여진시의 지하수위 변화를 응력 회복 단계의 변화로 고려하여 이를 제외한 후 지진 규모 대비 지하수위 변동량을 도시해 보면, 지진 규모 5 미만의 지진에서는 지하수위 변화가 거의 발생하지 않아 일정 규모 이상에서 지하수위 변동이 나타났음을 보여준다(그림 5a). 다만, W11B는 11월 15일 16시 49분의 지진시 35.2 cm 정도의 상승이 발생하였으며, 이에 대해서는 지진 메카니즘과 연계한 추가 분석이 필요해 보인다.

본진을 대상으로 진앙지와의 거리와 지하수위 변동량과의 관계를 도시해 보면, 거리에 따른 지하수위 변동 규모는 상관성을 보이지 않았으며(그림 5b). 에너지 밀도와 지하수위 변동량과의 관계에서도 상관성이 나타나지 않았다. 이와 같이 진앙과의 거리와 지하수위 변동의 일관성이 낮은 것은 충적층의 두께, 매질의 이방성 및 불균질성, 지진 응력의 비선형성 등이 작용하기 때문으로 보인다(Wang and Chia, 2008).

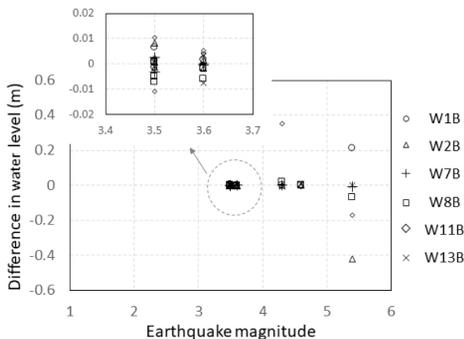
5. 하천 유량 변화의 가능성

지진은 파쇄대의 확장 또는 압축을 야기시켜 지하수위를 상승 또는 하강 시키는 작용을 가져오는데, 이와 같은 지반의 변화는 하천의 유량 변화를 동반하게 되며 수 주 내지 수 개월 동안 지속되기도 한다(Wang et al., 2004b). 지진시 하천 유량 증가는 파쇄대 투수성의 증가, 액상화 또는 느슨한 입자의 고결 작용 등에 의하여 물이 배출되기 때문으로 추정하고 있다(Chen and Wang, 2009). Loma Prieta 지진(M=6.9)시 캘리포니아 건조 지역의 진앙 50 km 이내의 하천에서 유량 증가가 발생하여 총 0.01 km³의 유량이 증가된 바 있다(Rojstaczer et al., 1995).

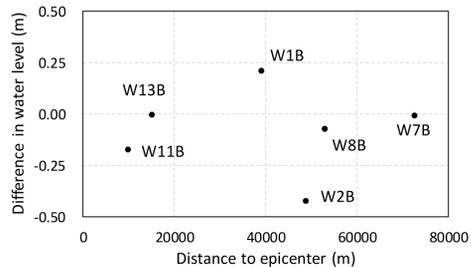
또한, 2014년 미국 South Napa 지진(M 6.0)시 지진 직후 하천 유량이 지진에 의하여 10⁶ m³ 증가하였으며 인근 산지 지형으로부터 지하수가 유입, 배출된 것으로 평가된 바 있다(Wang and Manga, 2015).

형산강을 따라 위치한 5개의 하천 유량 관측지점의 수위 및 유량 자료를 보면, 강우가 없었음에도 불구하고 지진 전후로 변화가 나타났음을 알 수 있다(www.wamis.go.kr). 조위의 영향을 받는 S5 지점(관측장비 영점 표고: -1.094 El.m)을 제외하고 상류에서부터 지진 직후 하천 수위 변화량은 S1에서 11월 16일 7시에서 8시 사이에 0.01 m 하강 후 0.02 m 상승 및 하강 후 유지, S2는 지진 직후부터 17일 00시까지 0.03 m 하강 후 0.01 m 상승하여 유지, S3은 지진과 동시기적으로 0.02 m 하강 후 상승하여 반복하는 특성, S4는 17일 04시 18일 06시까지 0.05 m 하강 0.04 m 상승하는 특성을 보이고 있어 대부분 0.04 m 이하의 변동을 나타내고 있다. 형산강 하류 인근에 위치한 W11B의 지진 후 지하수위는 약 17 cm(본진 직후) 정도 하강, W13B는 약 10 cm(11월 15일 15:00 ~ 16일 09:00 기간) 하강하였다(그림 6). 하천 주변의 모래자갈층의 비산출율을 약 0.25로 고려한다면, 하강으로 인한 수체의 두께는 약 4.25 ~ 2.5 cm 정도에 해당한다. 실제 S4 지점의 하천 수위는 약 5 cm 하강하고 있어 지하수위 보다는 약간 크나 유사함을 알 수 있다. 지진 이후 하천수위가 최저에 도달하는 시간은 약 1~3일 정도로 나타났으며, 재상승하여 최고에 이르는 시간은 약 3~6일 정도로 나타났다.

또한, 일 유량의 변화는 S1은 15일 0.47 m³/s에서 16일 0.38 m³/s로 감소(변화량: 0.09 m³/s) 및 18일 0.52 m³/s로 증가(0.14 m³/s) 하였으며, S2는 15일 3.75 m³/s에서 17일 3.6 m³/s로 감소(0.15 m³/s)



(a) Earthquake magnitude



(b) Distance to earthquake epicenter (M=5.4)

Fig. 5. Change in groundwater levels corresponding to earthquake magnitude.

및 19일 3.65 m³/s로 증가(0.05 m³/s) 하였다. S3는 16일 2.14 m³/s에서 18일 1.49 m³/s로 감소(0.65 m³/s) 한 후 21일 2.29 m³/s로 증가(0.80 m³/s) 하였다. S4는 16일 4.91 m³/s에서 18일 2.93 m³/s로 감소(1.98 m³/s) 한 후 22일 4.28 m³/s로 증가(1.35 m³/s) 하였다. 4개 지점 모두에서 지진시 유량이 줄었다가 다시 증가하는 특성을 잘 보여주고 있다. S1과 S3 지점을 보면, 상승 이후의 유량이 하강 이전의 유량 보다 큰 것으로 나타나고 있어 갈수기의 유량 감소 현상이 아닌 지진 이후의 감소 후 배출로 설명이 되어야 한다.

또한, 하류로 가면서 변화의 폭이 큰 것은 지진시 발생된 지하수위의 강하와 더불어 지배 면적의 크기의 차이에 의한 것으로 보인다. 즉, S3 및 S4 등 형산강 하류에 가까울수록 유량의 감소 및 증가 폭이 큰 것은 진앙에 가까운 W12B 및 W13B에서 보듯이 하류에서의 지하수위 변동 폭이 크고 장기간 유지되기 때문이다. 진앙지 주변의 액상화 현상으로 인한 수체의 체적 변화가 하천 유출에 영향을 미친다고 연구된 바 있으나(그림 7a; Chen and Wang, 2009), 본 연구의 경우, 액상화의 주요 발생 지점이 하천 관측 지점보다 하류이며 형산강 주변에서의 액상화 증거가 부족하므로 액상화에 의한 하천 유량 변화를 직접 설명하는 것은 어렵다. 따라서, 그림 3에서 보는 바와 같이, 유역 전반에 걸쳐 나타나는 지하수위의 하강(상승) 후 상승(하강)하는 과정에 지하수가 배출되면서 나타난 현상으로 보인다. 이는 하천 유량이 감소하기 이전과 거의 동일한 유량 또는 작은 유량으로 회복된다는 점에서 설명이 가능해 보인다. 하강 기간의 총 유량은 S1은 7,776 m³ (11월 15일~16일),

S2는 12,960 m³ (11월 15일~17일), S3은 56,160 m³ (11월 16일~18일), S4는 171,072 m³ (11월 16일~18일)이며, 상승 기간의 총 유량은 S1은 12,096 m³ (11월 16일~18일), S2는 4,320 m³ (11월 17일~19일), S3은 69,120 m³ (11월 18일~21일), S4는 116,640 m³ (11월 18일~22일)로 나타났다. 실제 지진에 의한 순증가 또는 순감소 유량에 대해서는 지하수-지표수 상호작용 메커니즘을 토대로 추가 연구가 필요해 보인다.

하류의 지진 영향이 상대적으로 클 것으로 예상되는 S3 및 S4 지점의 하천 유량 변동 주기성을 검토해 보았다. S3의 경우 11월 25일 이후에는 5일 정도의 주기성인 반면에 지진 직후에는 6일 정도, S4의 경우에는 11월 25일 이후에는 5일 정도인 반면에 지진 직후에는 6~7일 정도로 나타났다. 이와 같은 점은 지진 직후의 수위 변화로 지하수와 하천의 상호작용에 일시적 변화가 존재하였을 가능성을 보여준다.

한편, 강우가 거의 없고 여진이 작았던 2018년 1월부터 2월까지의 무강우 기간 동안의 하천 유량 변화를 보면, 4개 관측 지점 모두 1월 16~17일 및 2월 28일의 강우에 의하여 하천 유량이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 강우 이후 하루 정도 경과하여 최대값을 나타내고 있다(그림 7b). 유량의 변화 폭을 비교해 보면, 2018년 1월 16~17일 2일간 약 18 mm 정도의 강우에 의하여 상승된 하천 유량과 유사하거나 더 큰 규모의 유량 변화가 지진 발생 시점에 나타났음을 알 수 있는데, 이는 강우에 의해서는 유량 변화를 설명하지 못함을 의미하며, 유사하게 2018년 2월 11일에 포항 인근에서 규모 4.6의 여진시에도 미약한 유량 변화가 존재함을 알 수 있어 지진의 영향을 보여주고 있다. 또한, 지진시는 평소 갈수기와 비교

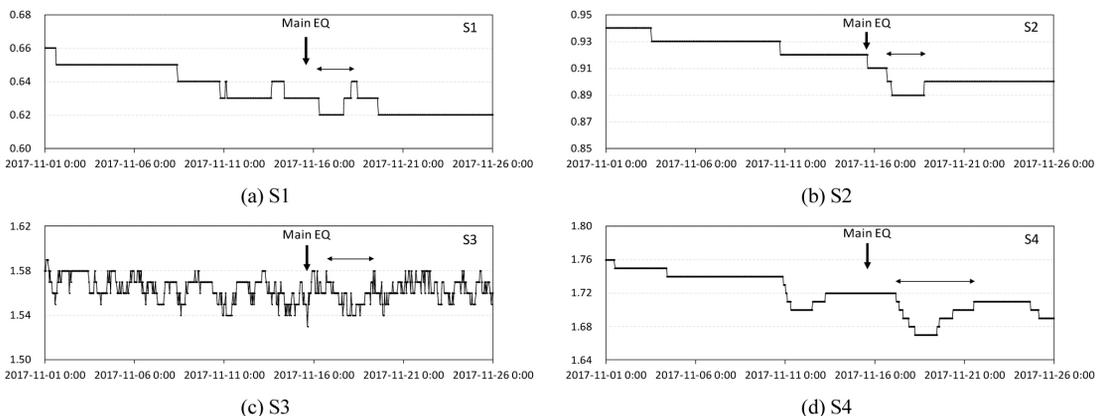


Fig. 6. Time series of stream water levels (x axis: time (hourly data), y axis: height (m)).

하여 상승 하강의 반복적인 형태가 나타날 뿐 아니라, S4의 하천 유량의 감쇠 형태에서 보듯이 무강우 기간의 일시적 강우에 의하여 상승된 유량의 강하 기울기는 지수함수적 빠른 강하 특성에 가까우나, 지진시 증가된 유량의 강하 기울기는 보다 완만하고 긴 기간 동안 회복이 이루어짐을 알 수 있는데, 이는 지진 영향을 설명하는 기존 연구와 유사한 결과를 보여주고 있다(Wang *et al.*, 2004b).

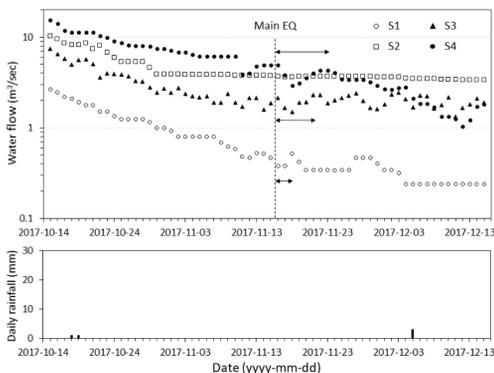
6. 토론 및 결론

지진에 의한 지하수위 변동 원인에 대해서는 세계적으로 다양한 연구들이 수행되어 왔으나, 매질의 비선형성 및 복잡성, 수리특성의 다양성 등으로 인하여 명확하게 설명하기는 쉽지 않다. 본 연구에서는 포항 지진시 발생된 지하수위 및 하천 유량 변동의 규모에 대하여 평가하는데 주안점을 두었으며, 발생 기작이나 원인에 대한 접근은 추후 연구를 통하여 수행될 필요가 있겠다. 경주 지진과 마찬가지로 포항 지진 시에도 지하수의 변화가 여러 지점에서 인지되었는데, 진앙과의 거리에 따른 수위 변동량의 차별성은 나타나지 않았다. 지진 규모별로 보면 포항지진의 경우에 규모 5.4의 본진 시에는 지하수위 변화가 뚜렷하게 인지가 되었으나 여진의 경우에는 명확하지 않았다. 이와 같은 현상은 근본적으로 지진으로 인한 에너지의 규모, 지반 진동의 크기 및 매질의 특성 등의 차이에서 비롯될 수 있으나, 본 수위 데이터의 취득 주기가 5분 간격인 점을 고려한다면 측정 시간 사이의 수위 변동을 인지하지 못하거나

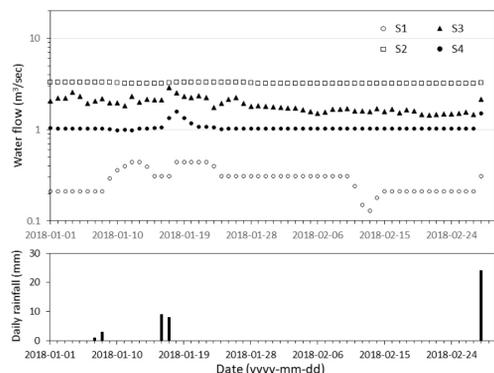
상승 또는 하강 중의 수위가 측정될 수 있다는 점도 추가로 고려되어야 한다. 또한, 본 연구에서는 본진과 여진의 응력장에 대한 분석이 수행되지 않아 공간적인 지하수위 변동 특성에 대한 평가가 이루어지지 않았다. 추후 지진 응력의 trigger zone 및 shadow zone에서의 지하수위 특성 차이에 대한 분석이 수행된다면 보다 정량화된 지하수위 변동 특성을 도출할 수 있을 것이다.

형산강의 하천 수위를 보면, 지진 발생 전후 약 1달 동안의 무강우로 인하여 수위가 지속적으로 하강하였는데 수위 하강 기울기가 지진 시점을 지나면서 완만해지는 특성을 보였다. 지진 후 수일 이내의 하천 유량 상승은 무강우시에 나타나는 일반적인 감쇠 특성과 차이를 보이고 있어 지진에 의한 감소 및 증가의 가능성이 존재한다. 지진시 하천 유량의 변화 요인은 지진 응력으로 인한 암석 투수성의 증가 및 토양내 공극압의 변화 등이 해당되는데(Manga *et al.*, 2003), 특히 포항 지진시에는 액상화 현상이 나타난 바 있어 형산강 주변에서의 액상화와 토양 공극압의 변화에 대한 추가 연구가 필요해 보인다. 또한, 지진 이후 수일 이상 유량의 변화 기울기가 완만하게 나타나는데 이는 일반적인 강우 이후의 지수함수적 빠른 하강과는 다소 다른 현상으로서 유역내에서 지속적인 물의 배출이 발생되고 있음을 의미하여 지진에 의한 영향이라고 해석할 수도 있으나(Wang *et al.*, 2004b), 이에 대한 분석은 액상화와 연계하여 추가 연구가 필요해 보인다.

최근 들어 지진으로 인한 다양한 분야의 연구가 수행되고 있는데, 지진에 대한 보다 체계적인 이해



(a) Stream water flow for two months around the earthquake in 2017



(b) Stream water flow for two months from January 1 to February 28 in 2018

Fig. 7. Changes of daily stream water flow rate after earthquakes.

및 접근을 위해서는 다양한 요소를 활용한 관측 체계가 구축될 필요가 있으며, 보다 장기적 관점에서 조사 및 연구가 수행되길 기대해 본다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 2018 국토교통기술혁신 연구사업의 연구비 지원(과제번호 18CTAP-C129727-02)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- 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, 2390, doi:10.1029/2002JB002321.
- Chen, C.H., Wang, C.H., Wen, S., Yeh, T.K., Lin, C.H., Liu, J.Y., Yen, H.Y., Lin, C., Rau, R.J. and Lin, T.W., 2013, Anomalous frequency characteristics of groundwater level before major earthquakes in Taiwan. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 1693-1703.
- Chen, J. and Wang, C.Y., 2009, Rising springs along the Silk Road. *Geology*, 37, 243-246, doi:10.1130/G25472A.1.
- Coussot, P., 1995, Structural similarity and transition from Newtonian to non-Newtonian behavior for clay-water suspensions. *Physical Review Letters*, 74, 3971-3974.
- Kim, G.B., Choi, M.R., Lee, C.J., Shin, S.H. and Kim, H.J., 2018, Characteristics of spatio-temporal distribution of groundwater level's change after 2016 Gyeongju earthquake. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54(1), 93-105 (in Korean with English abstract).
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2018, Earthquake in the South-eastern Region of Korean Peninsula. KIGAM, Daejeon, 56 p.
- Lai, W.C., Hsu, K.C., Shieh, C.L., Lee, Y.P., Chung K.C., Koizumi, N. and Matsumoto, N., 2010, Evaluation of the effects of ground shaking and static volumetric strain change on earthquake-related groundwater level changes in Taiwan. *Earth Planets Space*, 62, 391-400.
- Liu, C.-Y., Chia, Y., Chuang, P.-Y., Wang, C.-Y., Ge, S. and Teng, M.-H., 2018, Streamflow changes in the vicinity of seismogenic fault after the 1999 Chi-Chi earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 175, 2425-2434, DOI 10.1007/s00024-017-1670-3
- Manga, M., Brodsky, E.E. and Boone, M., 2003, Response of stream to multiple earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 30(5), 18-1-18-4.
- Mohr, C.H., Manga, M., Wang, C.-Y. and Korup, O., 2017, Regional changes in streamflow after a megathrust earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 458, 418-428, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2016.11.013>.
- Mohr, C.H., Montgomery, D.R., Huber, A., Bronstert, A. and Iroumé, A., 2012, Streamflow response in small upland catchments in the Chilean coastal range to the MW 8.8 Maule earthquake on 27 February 2010. *Journal of Geophysical Research*, 117, F02032, doi:10.1029/2011JF002138.
- Orihara, Y., Kamogawa, M. and Nagao, T., 2014, Preseismic changes of the level and temperature of confined groundwater related to the 2011 Tohoku earthquake. *Scientific Reports*, 4, doi:10.1038/srep06907.
- Rojstaczer, S., Wolf, S. and Michel, R., 1995, Permeability enhancement in the shallow crust as a cause of earthquake-induced hydrological changes. *Nature*, 373, 237-239.
- Shi, Z., Wang, G., Manga, M. and Wang, C.Y., 2015, Continental-scale water-level response to a large earthquake. *Geofluids*, 15, 310-320.
- Wang, C.Y., 2007, Liquefaction beyond the near field. *Seismological Research Letters*, 78, 512-517.
- Wang, C.Y., Cheng, L.H., Chin, C.V. and Yu, S.B., 2001, Coseismic hydrologic response of an alluvial fan to the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Geology*, 29, 831-834.
- Wang, C.Y. and Chia, Y., 2008, Mechanism of water level changes during earthquakes: near field versus intermediate field. *Geophysical Research Letters*, 35, L12402, doi:10.1029/2008GL034227.
- Wang, C.Y., Chia, Y., Wang, O.L. and Dreger, D., 2009, Role of S waves and Love waves in coseismic permeability enhancement. *Geophysical Research Letters*, 36, L09404, doi:10.1029/2009GL037330.
- Wang, C.Y. and Manga, M., 2014, Earthquakes and Water, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer Science + Business Media New York 2014, DOI 10.1007/978-3-642-27737-5_606-1.
- Wang, C.Y. and Manga, M., 2015, New streams and springs after the 2014 M6.0 South Napa earthquake. *Nature Communications*, 6, 7597, doi: 10.1038/ncomms8597.
- Wang, C.Y., Wang, C.H. and Kuo, C.H., 2004a, Temporal change in groundwater level following the 1999 (Mw=7.5) Chi-Chi earthquake (1999), Taiwan. *Geofluids*, 4, 210-220.
- Wang, C.Y., Wang, C.H. and Manga, M., 2004b, Coseismic release of water from mountains: evidence from the 1999 (Mw=7.5) Chi-Chi earthquake. *Geology*, 32, 769-772.
- Wang, S.J., Hsu, K.C., Lai, W.C. and Wang, C.L., 2015, Estimating the extent of stress influence by using earthquake triggering groundwater level variations in Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111, 373-383.
- Wiesner, M., 1999, Morphology of particle deposits. *Journal of Environmental Engineering*, 125, 1124-1132.
- Yan, R., Woith, H. and Wang, R., 2014, Groundwater level changes induced by the 2011 Tohoku earthquake in China mainland. *Geophysical Journal International*, 199(1), 533-548.
- Yan, R., Woith, H., Wang, R. and Zhang, Y., 2016, Earth's free oscillations excited by the 2011 Tohoku Mw 9.0 earthquake detected with a groundwater level array in mainland China. *Geophysical Journal International*, 206(3), 1457-1466.

Received : August 17, 2018

Revised : October 4, 2018

Accepted : October 8, 2018