



2016년 경주 지진시 지하수위 변동의 시공간적 분포 특성

김규범¹ · 최명락¹ · 이찬진² · 신선호³ · 김형종^{3,*}

¹대전대학교 건설안전방재공학과

²한국수자원공사

³(주)지애펜테크

요 약

경주 지역 12개소의 지하수 관측정 지하수위 자료(1시간 간격 측정 자료)를 활용하여 경주 지진 전후의 변동 특성을 분석하였다. 지진 발생 이후의 지하수위 변동 유형을 분석한 결과, 3개 관측정에서는 지하수위의 상승 및 지속 유지 특성, 1개 관측정에서는 지하수위 하강 및 지속 유지 특성을 보였다. 지하수위 시계열 자료의 주성분 분석 결과, 지진에 의한 지하수위 상승을 보여주는 주성분이 도출되었으며, 3개 관측정은 이 주성분 특성이 잘 반영되어 나타난다. 지하수위 감쇠곡선을 분석한 결과, 3개 관측정은 지진 이후 수위 상승의 특성이 반영되었으며 1개 관측정에서는 감쇠곡선의 모양이 변화되는 것으로 나타났다. 이들 결과를 종합한 결과, 4개의 지하수 관측정의 지하수위는 수위 상승 및 하강 패턴의 변화가 잘 나타나며 Coulomb 응력장의 trigger zone에 위치하는 등 지진의 영향이 존재하는 것으로 평가되며, 추후 기타 관측정에 대해서도 강우 요인을 제거한 후 미세한 변동에 대한 보다 정밀한 분석을 통하여 지진 영향을 평가할 필요가 있다.

주요어: 지진, 지하수, 주성분분석, 감쇠곡선

Gyoo-Bum Kim, Myoung-Rak Choi, Chan-Jin Lee, Seon-Ho Shin and Hyeong-Jong Kim, 2018, Characteristics of spatio-temporal distribution of groundwater level's change after 2016 Gyeong-ju earthquake. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 54, no. 1, p. 93-105

ABSTRACT: Change of groundwater levels before and after Gyeong-ju earthquake is analyzed for 12 monitoring wells (with 1 hour interval observations) in Gyeong-ju region. The pattern analysis of groundwater level time series shows that the rising and maintaining features of groundwater levels after the main earthquakes exist at three wells and the falling and maintaining features exist at one well. The principal component analysis shows that a new principal component, which signifies an increase of water level, is produced after the earthquake and three wells have this component features distinctly. Recession curve analysis of groundwater levels also explains that the increasing characteristics of water levels are fairly reflected at three wells and a pattern change of recession curve between pre- and post-earthquake occurs at one well. As a result, four groundwater monitoring wells show the trend of increasing or decreasing of water levels considerably, which are mostly located at the trigger zone of the Coulomb stress field and affected by the earthquake. More detailed analysis is required for the monitoring wells to reveal the effect of the earthquake considering a minor change of groundwater level without a rainfall effect.

Key words: earthquake, groundwater, principal component analysis, recession curve

(Gyoo-Bum Kim and Myoung-Rak Choi, Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea; Chan-Jin Lee, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 34045, Republic of Korea; Seon-Ho Shin and Hyeong-Jong Kim, Geology & Technology Co. Ltd., Anyang 14107, Republic of Korea)

1. 서 언

2016년 9월 12일(오후 7시 44분) 이후 경상북도 경주시에서 발생한 지진($M=5.1$, $M=5.8$)은 기상청 계기

지진 관측 이후 한반도에서 발생한 최대 규모의 지진으로서, 2017년 상반기까지 수 백 회가 넘는 여진을 동반한 바 있다. 또한 2017년 11월 15일(오후 2시 29분) 포항지진($M=5.4$)이 발생하면서 우리나라는 지진

* Corresponding author: +82-31-457-0306, E-mail: nanmanj@naver.com

안전지대가 아니라는 인식이 고조되고 있다.

세계적으로 1930년대에 지각 변형과 지하수위의 상관성에 대한 기초 연구가 시작된 이후 지하수위 자동 측측이 활발해지기 시작하는 1970년대 이후에 다양한 연구들이 수행되었다(Leggette and Taylor, 1935; Bower and Heaton, 1978; King *et al.*, 1999). 지진 동시기적 지하수위 변화는 단층 파쇄시 미끄러짐 면에 의한 Volumetric strain에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다(Ge and Stover, 2000; Jónsson *et al.*, 2003). 지진 발생시 지하수위 변동은 지진 단층으로부터의 거리에 따라 차이를 보이는 것으로 연구된 바 있는데, 1989년 타이완의 Chi-Chi 지진($M=7.6$) 발생시 지하수위가 급변하였으며, 지하수위가 지수함수적으로 증가 또는 감소하는 것으로 해석된 바 있다(Chia *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2001, 2004). 또한, 상기 지진에 대하여 지진 발생 전후의 지하수위 변동 패턴 및 주기 변화에 대한 연구를 통하여 진앙지 주변의 지표 변위와 지하수위의 비정상적 상승 및 하강과의 관계를 비교 분석한 바 있다(Chen *et al.*, 2013).

2011년의 일본 Tohoku 지진($M=9.0$) 발생시 중국의 73개 관측공에서의 지하수위 변화가 나타났으며 심도, 대수층 구성 성분, 진앙과의 거리, 방향 등과의 비교 분석을 실시한 바 있다(Yan *et al.*, 2014). Wenchuan 지진($M=8.0$)시에는 중국 전역의 197개소의 지하수 관측소에서 지하수위 변동이 발생하였는데 3가지 유형(Co-seismic oscillations, Co-seismic step changes, Gradual postseismic changes)으로 특성이 분류된 바 있고, 진원으로부터 거리, 암석 특성과 수위 변동 규모는 광역적으로는 상관성이 낮은 것으로 연구된 바 있다(Shi *et al.*, 2015). 국내의 경우에도 최근 들어 지진에 의한 지하수위 변화에 대한 연구가 시도되고 있으며, 2007년 오대산 지진($M=4.9$) 발생시 국가 지하수 관측소 8개소에서 암반 지하수위의 변동이 발생하였음을 밝힌 바 있고(Lee *et al.*, 2011), 발생빈도가 상대적으로 많은 소규모($M=3.0$ 내외) 지진시의 지하수위 변동 특성을 파악하여 지진 관측을 위한 지하수 관측공의 설치 필요성을 제시한 바 있다(Woo *et al.*, 2015). 또한, 본 경주 지진과 관련해서는 경주지역 5개 국가 지하수관측소의 일 평균 자료를 활용하여 지진시 지하수위 반응을 평가한 바 있다(Lee, 2016).

본 연구에서는 2016년 9월 경주 지진 이후에 진앙지 인근에서 나타난 지하수위의 시간적 및 공간적 변동 특성을 시계열 자료를 토대로 분석하고 지진과의 상관성에 대하여 검토하였으며, 지진에 의한 지하수위 변화 여부를 예비적으로 진단하고 추가적인 연구 방향을 제시하는데 목적을 두었다.

2. 연구 지역

2016년 9월 12일 지진은 경주시 남남서쪽 약 8 km 부근에서 발생되었는데, 진앙 지역인 경주시 내남면 및 그 주변부는 양산단층, 밀량단층, 동래단층, 모량단층, 일광단층 및 울산단층 등 다양한 규모의 단층이 존재하는 지역이다. 이들 단층들은 경상분지내에 발달하며 한반도 남동부 지역의 백악기 이후 지체구조 진화 및 변형사를 이해하는데 중요하며, 양산단층과 울산단층을 따라 다수의 지점에서 제4기의 단층운동이 보고되고 있어 주요 활성단층일 가능성이 매우 높은 것으로 알려져 있다(그림 1; Kim *et al.*, 2017).

연구지역내에는 경주 지진의 진앙지 주변으로 다수의 국가지하수 관측망이 위치하고 있으며, 이 중에

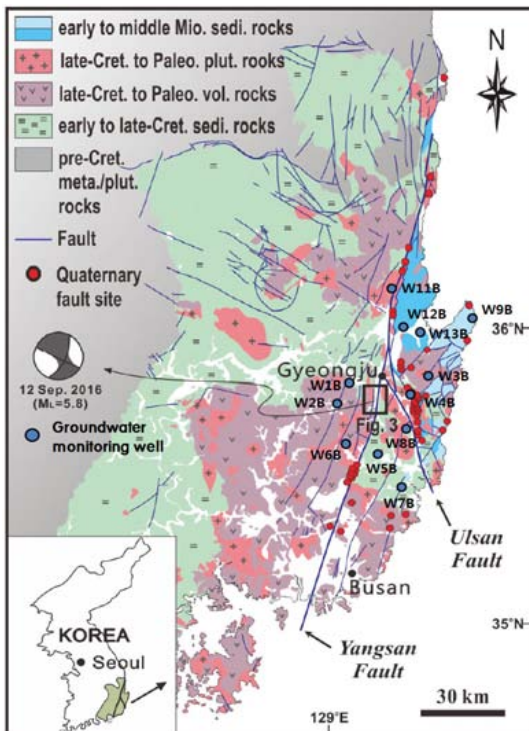


Fig. 1. Geologic map of the study area (modified from Kim *et al.*, 2017) and location of groundwater monitoring wells.

Table 1. List of groundwater monitoring wells in the study area.

Well	X-coord	Y-coord	Depth (m)	Diameter (mm)	k (m/d)	T (m ² /d)	Elevation (El.m)	Remarks
W1B	1144994.2	1759758.6	70	200	9.926×10^{-6}	0.43	89.09	near stream, agr. field
W2B	1139855.3	1751962.4	65	200	5.321×10^{-5}	2.39	200.04	valley
W3B	1172493.6	1761001.8	73	150	1.780×10^{-4}	0.05	136.22	valley
W4B	1164812.5	1752342.7	98	150	5.821×10^{-6}	5.04	96.80	near stream, agr. field
W5B	1154476.4	1732549.4	79	200	9.240×10^{-5}	-	23.76	near stream, agr. field
W6B	1142547.8	1736341.7	60	200	3.961×10^{-6}	-	198.56	near stream, agr. field
W7B	1162534.3	1719689.1	70	200	4.518×10^{-4}	-	12.32	near stream, agr. field
W8B	1163439.9	1739456.1	70	200	2.198×10^{-5}	-	57.80	valley
W9B	1187306.0	1783552.8	70	200	1.176×10^{-5}	-	41.60	slope
W11B	1158636.7	1794008.5	79	200	1.396×10^{-5}	-	80.38	agr. field
W12B	1163438.9	1779885.7	70	200	5.050×10^{-3}	-	5.89	agr. field
W13B	1169019.9	1777568.5	50	200	1.510×10^{-4}	-	28.73	slope

Table 2. Classification of time series of groundwater levels after a main earthquake and the average distance to epicenters.

Well	Increasing pattern	Decreasing pattern	Average distance to epicenter (km)	Well	Increasing pattern	Decreasing pattern	Average distance to epicenter (km)
W1B	A	I	16.9	W7B	A	I	37.6
W2B	B	II	18.6	W8B	A	I	22.2
W3B	A or B	I or II	25.3	W9B	A	I	48.1
W4B	B	II	18.3	W11B	C	II	43.4
W5B	A	I	24.9	W12B	A	I or II	31.9
W6B	C	II	23.8	W13B	A	I	32.4

Remarks) A: Peak type increase, B: Stair shape increase, C: Slow increase, I: Exponentially decrease, II: slow decrease.

서 진앙 기준 반경 약 30 km 이내에 위치한 12개의 국가 지하수 관측망의 암반지하수 관측정의 자료를 활용하여 지하수위 분석을 수행하였다. 각 관측정에서는 매 1시간 간격으로 지하수위, 전기전도도 및 온도를 측정하고 있으며, 약 70 m 깊이로 설치되어 있으며 구경은 150~200 mm로 구성되어 있다(표 1; 그림 1).

3. 지하수위 시계열 특성

연구지역내 12개소 지하수위 관측자료의 지진 전후의 변화를 보기 위하여 지진이 발생하지 않은 기간 (2014년 1월부터 2015년 12월까지 또는 2016년 상반기까지의 약 2년 자료, 이하 평년이라 함)과 지진이

발생한 전후 시점인 2016년 8월 이후(9월12일 지진 발생 전후 변화를 보기 위해 8월 자료도 함께 도시)의 기간으로 구분하여 시계열도를 작성하였다(그림 2). 지하수위는 기본적으로 강우에 의하여 상승하는 특성을 갖고 있기 때문에 지진에 의한 상승 규모를 평가하는 것은 추후 연구를 통하여 수행할 예정이며, 본 연구에서는 지하수위 시계열 형상에 기반한 정성적인 분류, 기본적 변동 패턴 평가 및 상승 요인 등에 대한 검토를 통하여 지진에 의한 영향의 가능성을 진단해 보았다.

지진 발생 시점 이후의 지하수위 상승 패턴을 그래프 상에서 보면 (a) 지진 이후 peak 형태로 상승하는 경우, (b) 계단상의 형태로 상승하는 경우, (c) 완만

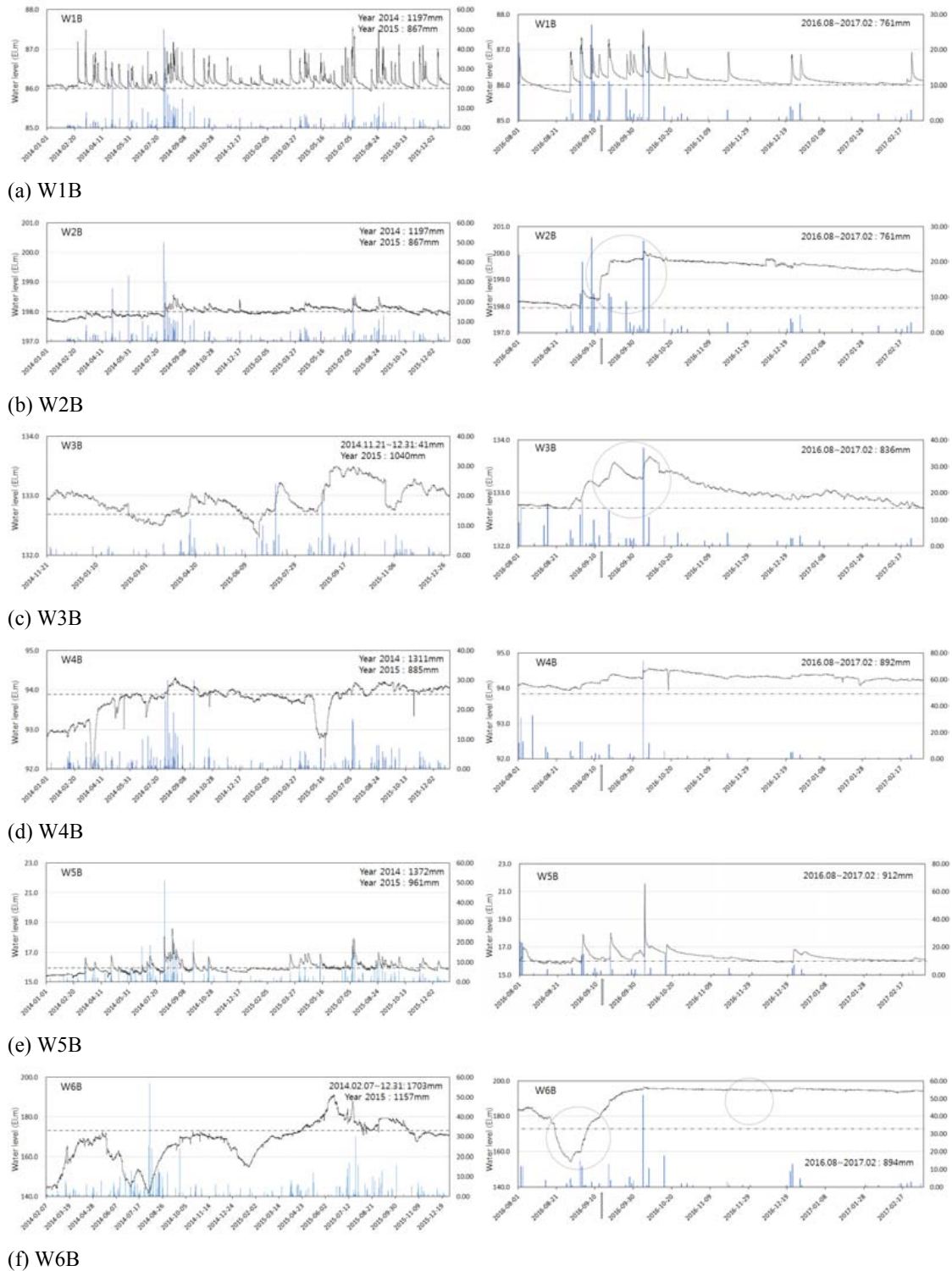
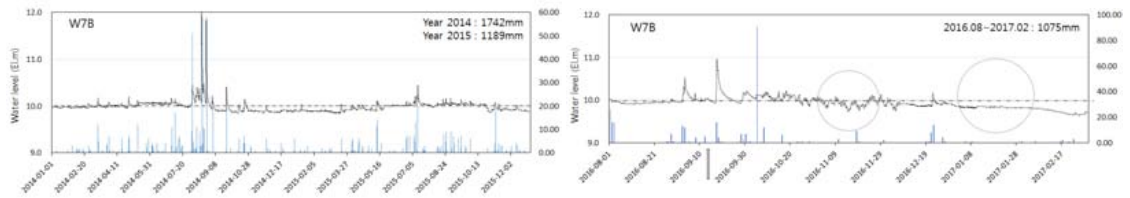
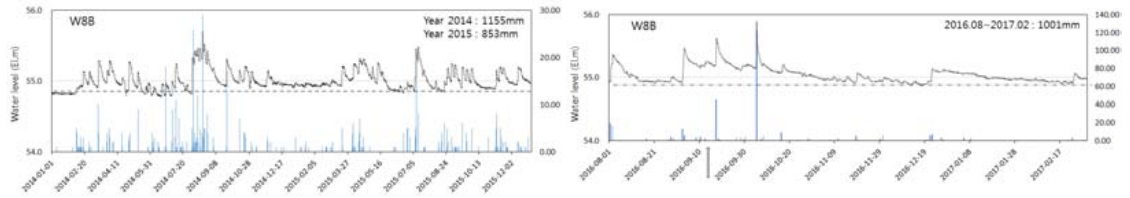


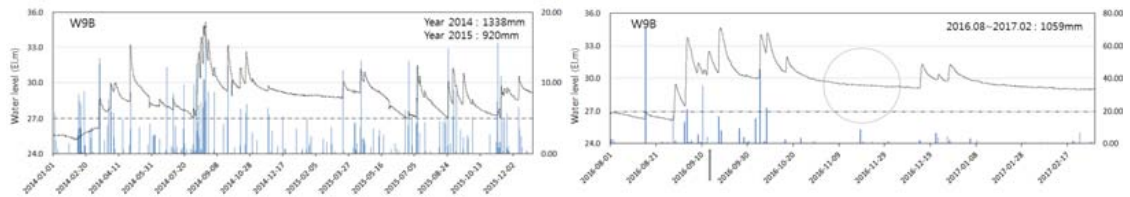
Fig. 2. Time series of groundwater levels and rainfall (left: period without earthquake, right: period with earthquake, line: observed data, bar and right axis: rainfall (mm), dashed: base groundwater level, arrow: a main earthquake).



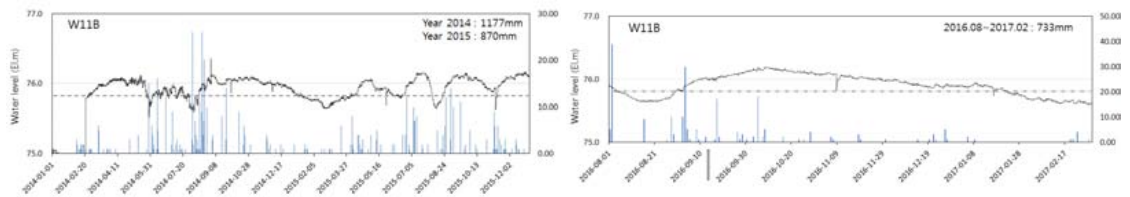
(g) W7B



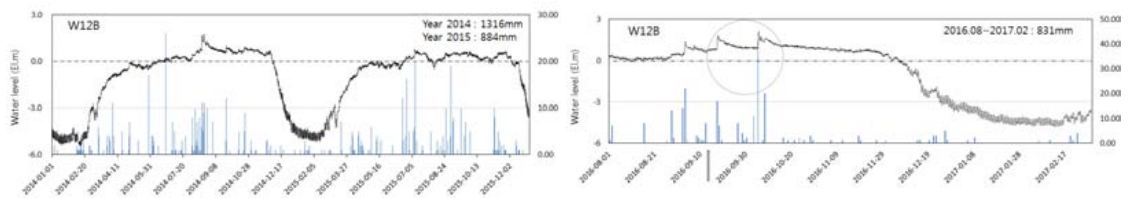
(h) W8B



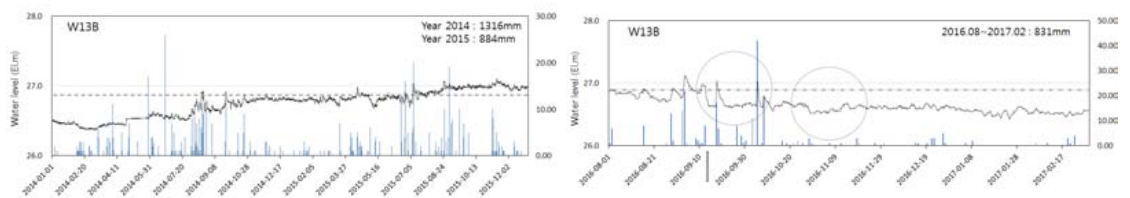
(i) W9B



(j) W11B



(k) W12B



(l) W13B

Fig. 2. Continued.

한 형태로 상승하는 경우로 구분이 가능하며, 상승된 지하수위의 하강 패턴을 보면 빠르게 (I) 지수적으로 강하하는 경우, (II) 완만한 강하를 보이는 경우로 구분할 수 있다(표 2).

지하수 관측정 지하수위는 시간 단위로 측정되고 있으므로 동일 수준의 비교를 위하여 지진의 규모에 대해서도 시간 단위의 누적 합을 산정하였으며, 진원지에 대해서도 1시간 동안 발생된 지진의 평균 진원을 구하여 분석에 활용하였다. 12개소 지하수 관측정의 지표 지점으로부터 진원까지는 약 16.9~48.1 km의 거리를 보이며, 그래프 상에서만 본다면 지하수 관측정의 지하수위 변화와 진원지까지의 거리와의 상관성은 잘 나타나지 않았다.

경주 지진 발생시 강우가 함께 존재하였기 때문에 지진에 의한 지하수위 변동을 정확히 정량화하는 것이 용이하지 않으나, 평년의 강우에 대한 지하수위 변화와 지진 이후의 강우에 대한 지하수위 변화를 비교함으로써 지진의 영향을 예비적으로 검토하였다. 평년 기간의 강우량을 보면, 2014년에는 관측지점별로 일부 차이가 있으나 1,177~1,742 mm로서 예년과 유사한 수준이었으며, 2015년은 가뭄으로 인하여 853~1,189 mm의 낮은 값을 보였다(그림 2). 지진 시점 이후 7개월 동안에는 733~1,075 mm의 강우량(평균 886 mm)을 보이는데, 이는 2014년부터 2015년까지 동 월의 강우량 669~1,202 mm (평균 855 mm)와 유사한 범위를 보이고 있어 전반적으로 경주 및 그 주변지역의 지진 이후의 강우는 평년과 유사한 수준으로 파악된다.

시계열 도표에서 보듯이 W1B, W5B, W7B, W9B, W11B의 경우에는 지진 발생 이후에 평년과 유사한 변동을 보이고 있으나, 기타 관측정에는 다양한 지하수위의 이상 변화가 나타난다. W2B는 지진 이후 급격한 계단상의 지하수위 상승이 나타났으며, W3B는 지하수위가 지속 유지되는 특성을 보이고 있다. W4B의 경우에는 예년보다 지하수위가 높으며 초기 지진 발생 2개월 후 무강우시에도 높은 지하수위가 유지되고 있고, W6B는 지진 이전에 급강하 하였으며 지진 이후에는 높은 지하수위 상승을 보이는데, W6B의 급강하 특성은 평년에도 나타나는 현상으로서 지진에 의한 변화 여부는 추가 연구가 필요해 보인다. W8B는 강우시 나타나는 지하수위의 peak 모양이 평년보다 뾰족한 특성을 보이며, W12B는 평년에 비하여

강우에 의한 수위 상승이 높으며 뾰족한 형태를 보이고 있다. W12B에서 3개월 후의 지하수위 급강하 현상이 나타나는 것은 평년의 동절기에도 나타난 현상으로서 비닐하우스 지역의 지하수 과다 양수에 의한 요인으로 추정된다. W13B는 지진 발생 이후 지하수위의 계단상 급감 및 지속적으로 유지되는 현상이 발생하였다.

각 관측정별로 지진이 발생하지 않은 기간(2014년부터 2015년 말 또는 2016년 상반기까지 약 2년 자료)의 시간 강우와 지하수위 반응에 대한 산점도와 지진 발생 이후 9월, 10월 및 11월~12월 등 3 구간에 대한 두 인자간의 산점도를 중첩, 작성하여 지진 이후 수개월간의 지하수위의 장기 변동성을 검토하여 위에서 평가한 지진 전후의 수위 변화 해석을 보완하였다(그림 3). 산점도는 평년 기간 동안 강우에 대한 지하수위의 교차상관분석을 통한 lag time 만큼 지연시켜 작도하였다. 따라서 그림에서 지진이 발생하지 않은 기간에 대한 두 인자간의 상관 추정식은 평상시의 강우에 의하여 상승하는 지하수위 반응을 설명한다.

W1B는 전체적으로 평년의 강우 대비 지하수위 반응의 분포 범위에 도시되나, 2016년 9월과 10월에는 강우가 작을 경우에도 상대적으로 높은 수위 범위를 보이고 있다. W2B는 지진 시 지하수위 급상승이 나타나고 이후 지속적으로 고수위가 유지되는 경향을 잘 보이며, 지진 규모가 가장 큰 9월보다는 10월의 지하수위가 더 높은 특징이 나타난다. 이는 연속적인 지진에 의하여 투수성의 변화 또는 충적층의 압축과 함께 반복된 응력이 지하수위의 계단상 상승을 야기하는 것으로 추정되며, 회복에 장기간이 소요되는 것으로 보인다(Wang *et al.*, 2004). W3B도 W2B와 유사하게 준계단상의 상승으로서 일정 기간 유지하고 서서히 하강하는 특성을 보이며 10월이 9월보다 수위가 높은 경향을 보인다. W4B는 W2B와 마찬가지로 상승한 지하수위가 상당 기간 동안 지속적으로 유지되는 현상이 나타나며, 9월보다 10월의 수위가 높은 특성을 보인다. W5B는 W1B와 유사하게 지진 이후의 강우 시 지하수위 상승이 평년의 산포 범위에 포함되고 있다. W6B는 평상시에도 강우에 의한 지하수위 반응이 뚜렷하지 않은 곳이며, 지진 이후인 9월과 10월의 지하수위가 높게 상승한 상태로 유지되는 특징이 나타난다. W7B는 W1B와 유사하게 강우에 의한 지하수위 상승 분포가 지진 전후로 뚜렷한 변화

를 보이진 않으나 10월에 약간의 하강이 유지되며 수십 mm 이상의 강우에도 낮은 수위를 유지하는 특성이 있다. W8B는 시계열도 상에서는 강우에 의한 지하수위 상승 peak가 지진 이후에 더욱 뾰족한 상태로 나타나고 있으나 미세한 차이에 불과하여 강우 대비 지하수위의 산점도에서는 명확한 차별성이 나타나진 않는다. W9B는 지진 이후의 강우 대비 지하수위 분포가 평년의 분포 범위 내에 도시되고 있으나, 9월, 10월, 11월로 가면서 상승하였던 수위가 강하하는 특성이 나타난다. W11B는 강우에 의한 지하수위 상승 반응이 뚜렷하지 않은 지역으로서 지진 이후의 강우 대비 지하수위 분포가 평년의 산점 범위에 포함되나 10월의 높은 수위가 지진에 의한 영향인지에 대한 추가적인 검토가 필요해 보인다. W12B는 10월

의 지하수위가 예년에 비하여 높게 유지되고 있으며, 11월 이후에 지하수위가 낮아 평년에도 유사한 낮은 수위가 존재한 것으로 나타난다. W13B는 산점도 상에서는 지진 이후의 데이터가 평년의 범위내에 도시되고 있으나, 9월의 지하수위가 상대적으로 높게 나타나며 10월에는 시간당 수십 mm 이상의 강우에도 수위가 낮게 유지되는 특성이 나타난다.

지진은 주변 암석에 영구적 팽창이나 수축을 발생시키기 때문에 지하수위가 진앙 인근에서 변화되는 것으로 알려져 있으며, 지하수위 변화를 야기하는 기작으로는 충적 퇴적층의 압축에 의한 가능성(Roeloffs, 1998), 공극에서 탈출한 gas가 유체압을 감소시키는 현상(Matsumoto and Roeloffs, 2001), 지진에 의한 유체 이동이 균열대내의 클로킹 제거

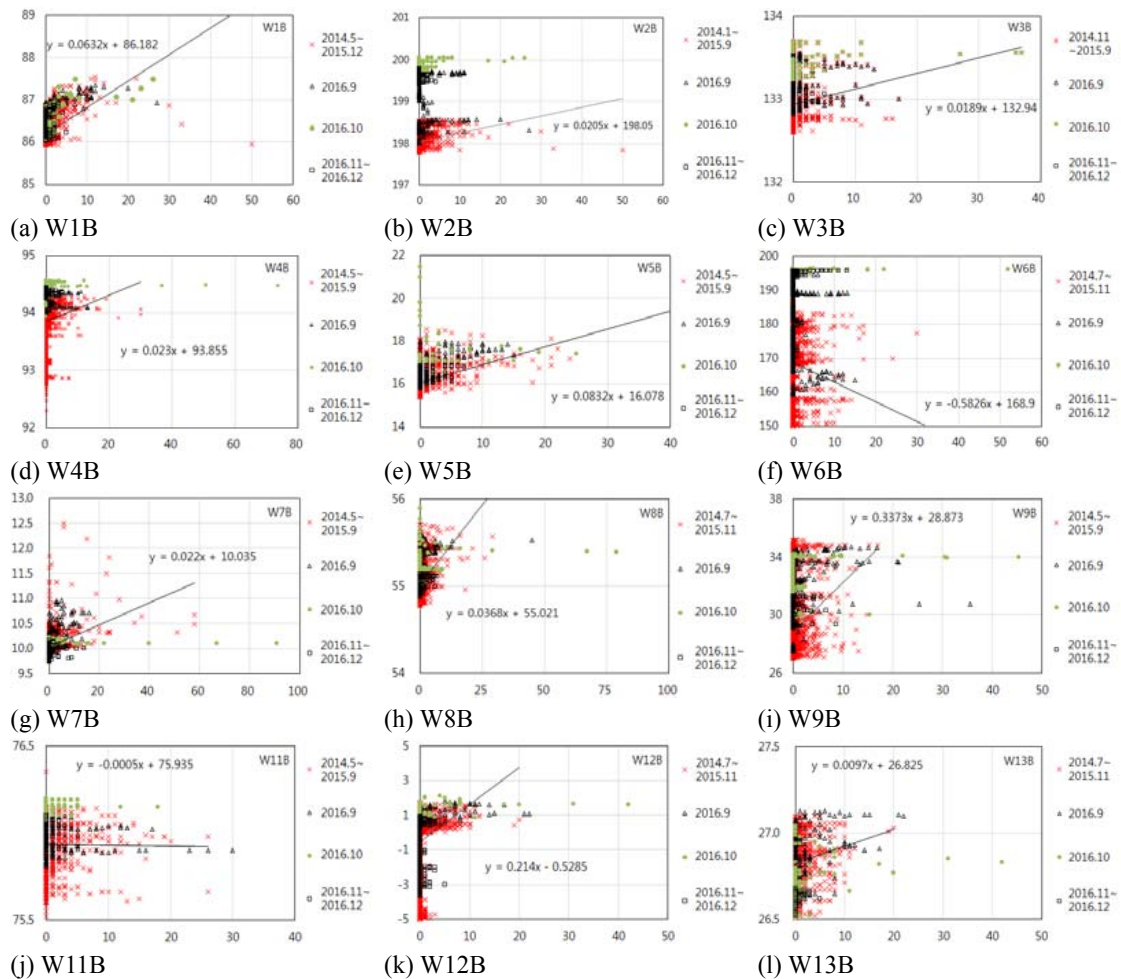


Fig. 3. Scatter plots between rainfall (x axis: mm) and groundwater level (y axis: El.m).

및 이완 작용으로 인한 암반내 투수성의 변화 현상(Brodsky *et al.*, 2003; Koizumi *et al.*, 2004), 액상화와 같은 상부 충적층의 압축 현상(Wang and Manga, 2014), 지진에 의한 암반내 투수성의 증가로 지표수의 유입에 의한 수위 상승(Wang *et al.*, 2004) 등으로 알려져 있어 매우 다양한 원인이 작용할 수 있다. 이와 같은 지하수위 변화 요인이 본 연구지역의 일부 관측점의 지하수위 변화에도 영향을 미쳤을 것으로 추정되는데 다음 절의 주성분 분석 및 감쇠곡선 분석 결과와의 연계 해석을 통하여 진단하고자 하였다.

4. 지하수위 주성분의 변화

지하수위 자료를 대상으로 지진 발생 이전(2014년 2월 8일~2015년 12월 31일)과 이후(2016년 9월 12일 ~ 2017년 2월 28일)의 시계열의 특성과 공간적 분포를 파악하기 위하여 주성분 분석을 실시하였다(지진 이전 기간에서 W3B는 관측기간이 상이하여 제외). 주성분 분석은 변수들의 상관행렬 또는 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 이용한 스펙트럼 분해를 이용하여 주성분이라는 새로운 변수를 생성하는 방

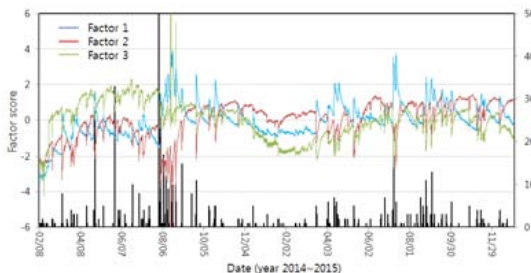
법이다. 이 방법을 이용하여 다수의 관측점에 대하여 서로 상관관계가 없는 몇 가지의 핵심 변수를 도출함으로써 관측점을 그룹으로 분류하고 지하수위 변동 패턴을 정의할 수 있다(Kim *et al.*, 2012).

주성분 분석 결과, 지진 이전 및 이후 모두 3개의 주성분이 전체 자료의 약 70% 및 87%를 설명하는 것으로 나타났다(표 3). 지진 발생 이전의 주성분 시계열도를 보면, 주성분 1은 강우에 의한 급격한 지하수위 상승 및 하강의 특성을 반영하는 요소이며, 주성분 2는 강우시 지하수위 급강하와 이후에 지연 시간을 갖고 완만하게 상승하는 지하수위 특성을 보이고 있다. 지진 발생 이후의 주성분 시계열도를 보면, 주성분 1은 지진 발생 이전의 주성분 1과 마찬가지로 강우에 의한 급격한 상승 및 하강 특성을 잘 보여주는 요소이며, 주성분 2는 지진 발생 이전과는 달리 주요 시점(본진 발생 시점)을 기점으로 지하수위 상승이 뚜렷하게 나타나는 특성으로서 10월 초까지 지하수위 상승을 보이고 이후에 완만한 하강을 보이고 있어 지진 이후 지하수위 상승 후 원상 복구에 긴 시간이 존재함을 보여준다(그림 4).

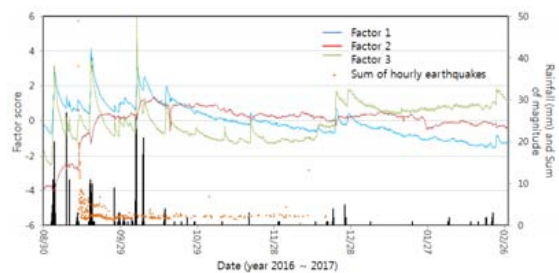
3개의 주성분 중에서 서로 독립적이면서 대표적

Table 3. Total variance explained from principal component analysis for groundwater levels before and after earthquakes.

Component	Extraction sums of squared loadings					
	Before earthquakes (2014~2015)			After earthquakes (after Sep. 2016)		
	Total	% of variance	cumulative %	Total	% of variance	cumulative %
1	4.620	41.996	41.996	6.217	51.807	51.807
2	2.078	18.895	60.891	3.159	26.321	78.128
3	1.047	9.520	70.411	1.062	8.850	86.978



(a) Before earthquakes



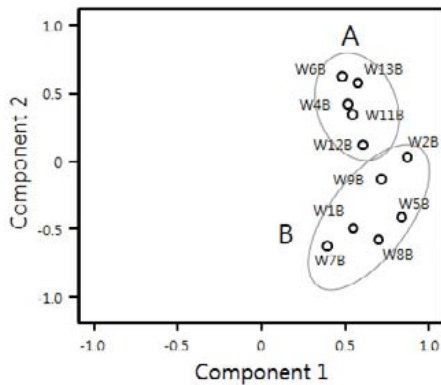
(b) After earthquakes

Fig. 4. Classification of time series of groundwater levels using principal component analysis for two cases: before and after earthquakes.

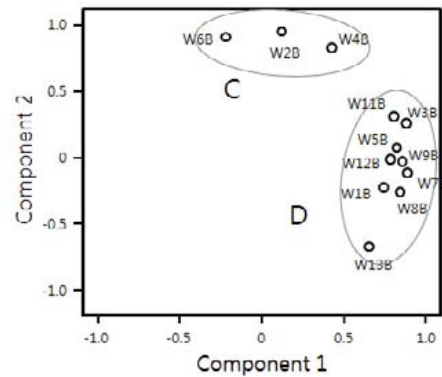
인 주성분 1과 주성분 2를 도표의 축으로 활용하여 각 관측점의 소속 범위를 도식화하였다(그림 5). 지진 발생 이전에는 모든 관측점에서 주성분 1의 특성을 뚜렷하게 갖고 있으며, 그룹의 구분은 주성분 2에 의하여 지배를 받는다. A 그룹에는 W4B, W6B, W11B, W12B, W13B가 해당되어 주성분 2의 영향이 잘 나타나는 관측점이며, B 그룹에는 W1B, W2B, W5B, W7B, W8B, W9B 등이 해당된다. 반면에 지진 발생 이후의 C 그룹에는 W2B, W4B, W6B가 해당되며,

D 그룹에는 W1B, W3B, W5B, W7B, W8B, W9B, W11B, W12B, W13B가 해당된다. 지진 발생 이후의 C 그룹은 주성분 2의 효과가 더욱 뚜렷해진 그룹으로서 지진에 의한 지하수위 상승 후 하강이 매우 완만하게 나타나는 특성을 갖는 그룹이다.

지진 전과 후의 각 관측점의 소속 그룹의 공간적 분포를 파악하기 위하여 지형도에 도시해 보았다(그림 6). 경주 지진의 Coulomb stress 분포와 지진 발생 이후 지하수위 그룹을 비교해 보면, W2B, W4B, W6B의

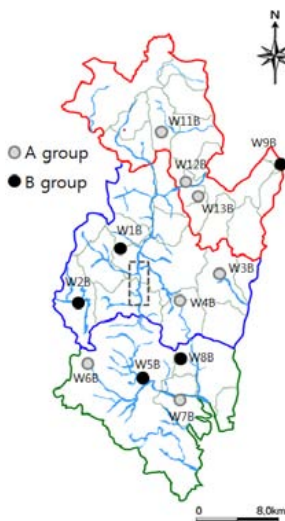


(a) Before earthquakes (n=11)

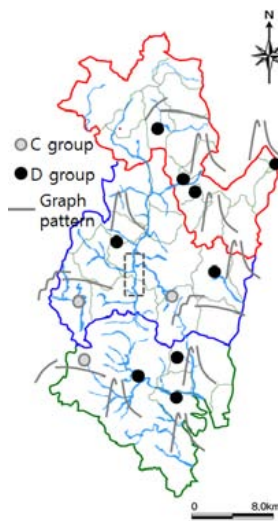


(b) After earthquakes (n=12)

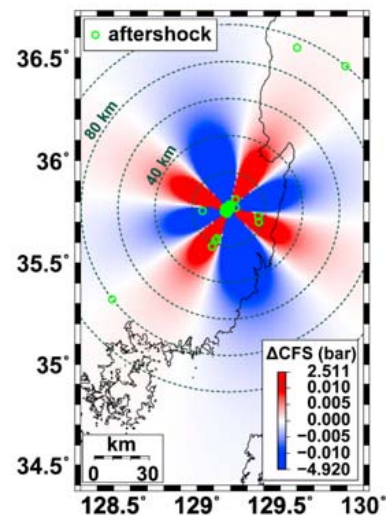
Fig. 5. Main components controlling groundwater levels and the location of the monitoring wells before and after earthquakes.



(a) Before earthquakes



(b) After earthquakes



(c) Spatial distribution of aftershocks over the Coulomb stress (by Hong et al., 2017)

Fig. 6. Spatial distribution of two groups of groundwater levels for two cases: before and after earthquakes (a: closed circle, b: open circle, c: Spatial distribution of aftershocks over the Coulomb stress changes induced by the ML5.1 and 5.8 earthquakes).

C 그룹은 진앙에 가까우면서 trigger zone에 위치하는 특성을 보이고 있다. D 그룹 관측정들은 진앙과 비교적 원거리에 위치하며 지하수위의 급상승 및 급하강 특성을 갖고 있으며 shadow zone에 다수가 위치하고 있다(그림 2 참조). 참고로 Wenchuan 지진($M=8.0$)시 197개 관측정의 지하수위의 변동을 도식한 결과, 압축 영역인 trigger zone에서는 지하수위 상승 현상, 팽창 영역인 shadow zone에서는 수위 강하 현상이 잘 나타나는 것으로 분석된 바 있는데(Shi *et al.*, 2015), 본 연구에서 trigger zone에서 지하수위 상승이 발생한 점은 Wenchuan 지진 연구의 trigger zone과 유사한 결과를 보여준다. Shadow zone내에서의 지하수위 강하 현상 여부에 대해서는 강우 요인의 제거, 조밀한 시간 간격의 계측 등을 통하여 추후 별도의 평가가 필요하다.

5. 지하수위 감쇠특성 변화

상승된 지하수위는 일정한 형태의 감쇠곡선을 보이게 되므로 지진 전후의 감쇠곡선의 변화 상태를 분석함으로써 지진의 영향을 간접 평가할 수 있다. 2년의 평년 기간과 지진 후 약 7개월간(여진 기간을 고려)의 지하수위 강하 특성을 비교함으로써 지진의 영향을 평가하고자 하였다. 위에서 언급한 바와 같이, 지진 이후 분석 기간 동안의 강우량이 평년의 강우량과 유사하므로 지진이 없다면 강우에 의한 지하수위 상승이나 하강이 평년과 유사할 것이라고 가정하였다. 따라서 지진 전후의 감쇠곡선 비교를 통하여 지하수위의 지진 영향에 대한 진단을 수행하였다.

연구지역 지하수 관측정의 지하수위 감쇠곡선은 W3B, W4B 및 W11B를 제외하고 지수 함수 형태로 설명이 된다. 평년 기간의 지하수위 자료로부터 추정된 감쇠곡선의 결정계수는 0.9084~0.9948로 매우 높게 나타났으며, 지진 후 7개월 기간 동안도 0.8632~0.9990으로 높게 나타났(그림 7). 지진 이전보다 지진 이후의 감쇠곡선의 시작점이 높은 관측정은 W1B (차이: 3.9 cm), W2B (131.0 cm), W3B (22.0 cm), W4B (7.7 cm), W5B (21.5 cm), W11B (6.4 cm), W12B (3.8 cm) 등으로서 W2B, W3B 및 W5B가 상대적으로 높은 값을 보인다. 특히, W2B의 경우에는 평년보다 강우가 적음에도 불구하고 초기 값이 높게 나타나 지진에 의한 수위 상승을 반영하는 것으로 보인다. 반

면에, W6B (차이: -297.0 cm), W7B (-41.1 cm), W8B (-21.6 cm), W9B (-182.6 cm), W13B (-26.6 cm)는 지진 이후의 감쇠곡선의 시작점이 이전보다 낮은 관측정에 해당된다. 이들 감쇠곡선 초기 수위가 낮은 관측정의 경우에는, 1 시간 간격의 측정 자료로 인한 지진 직전/직후 분석에 대한 제약점이 존재하며 시계열도 상에서는 일반적인 지진에 의한 수위 변화가 잘 보이지 않는데, 그 원인에 대해서는 강우 요인을 제거한 시계열 분석을 통하여 추가 연구되어야 할 것이다. 한편, 지하수위 감쇠곡선의 강하 기울기를 보면, W4B와 W12B를 제외한 모든 관측정에서 지진 이후에 완만해진 감쇠특성을 보이는 것으로 나타났으며, 특히, W6B는 매우 완만한 형태로 바뀌었음을 알 수 있다. 이와 같은 지진 이후 지하수위 강하 기울기가 완만해진 것은 본진과 여진의 누적에 의한 미세한 수위 상승이 수반되었을 가능성을 보여주며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

6. 토론 및 결론

지진 발생 전후의 지하수위 시계열 자료로부터 지진에 의한 지하수위 변동 가능성에 대한 포괄적 접근을 수행하였다. 본 연구에서는 지진 발생 시점의 초~분 단위의 짧은 시간 간격의 지하수위 반응 패턴 분석 및 강우 요인을 제거한 지하수위 변동성을 다루진 않았으며, 시간 단위의 지하수위 시계열 자료로부터 지진 전후의 변화 특성을 도출하고 이로부터 지진의 영향을 평가해 보고자 하였다. 지하수위 시계열 그래프를 활용한 정성적 평가, 주성분 분석에 의한 지진 영향의 반영 요소 검토, 지하수위 감쇠곡선상의 지하수위 변동 등을 토대로 아래와 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 지진 이후의 지하수위 변동이 평년과 어떤 차이를 보이는지 지하수위 시계열 자료를 토대로 정성적 평가를 실시한 결과, W2B, W4B, W6B는 비교적 뚜렷한 차이(상승 및 유지)가 나타났으며, W3B, W8B, W12B는 미세한 차이(peak의 양상, 고수위 유지)가 존재하고, W13B는 지진시 급강하 및 유지의 특성이 나타났다.

둘째, 지진 발생 이전과 이후에 대한 주성분 분석 결과, 지진 이후에 지하수위의 급상승 성분이 새로이 나타나고 있어 지진에 의한 지하수위 상승이 존재함

을 알 수 있다. 지하수위의 급상승 성분이 뚜렷하게 반영된 관측정은 W2B, W4B, W6B로서 지하수위 상승 후 고수위가 오랫동안 지속되는 특성을 보인다.

셋째, 지하수위 감쇠곡선의 특성으로 보면, W2B, W3B 및 W5B에서 지진 이전보다 이후의 감쇠곡선 초기값이 높은 값을 보여 지진에 의한 상승의 가능성을 나타내고 있으며, W6B는 감쇠곡선의 강하 모양이 변화되어 지진에 의한 영향이 반영된 것으로 보인다. 또한, 대부분의 관측정에서 감쇠곡선의 기울기가 지진 이후에 완만해진 것으로 나타나는데 상승된 지하수위의 강하가 평년보다 느려진 것은 지진에 의한 미세한 수위 상승이 반영되었을 가능성을 보여준다.

지진시 지하수위 상승 및 감쇠 특성은 다양한 형태로 나타나는 것으로 알려져 있다. 대만의 연구 사례 (Chi-Chi 지진, $M=7.5$)에서는, 70개소의 지하수 관측정 자료를 활용하여 지진시 지하수위의 변동 유형을 크게 4가지로 구분한 바 있다(Wang *et al.*, 2004). 이에 의하면, (1) 지진시 급상승 이후 점진적인 지하수위 감소를 보이는 경우(up-down response), (2) 지진시 하강 후 점진적으로 상승하는 경우(down-up response), (3) 지진시 하강후 지속적인 완만한 하강이 발생하는 경우(down-down response), (4) 지진시 상승 후 일정 수준으로 유지되거나 장기간 동안 완만하게 하강하는 경우(up-up response)로 분류되었

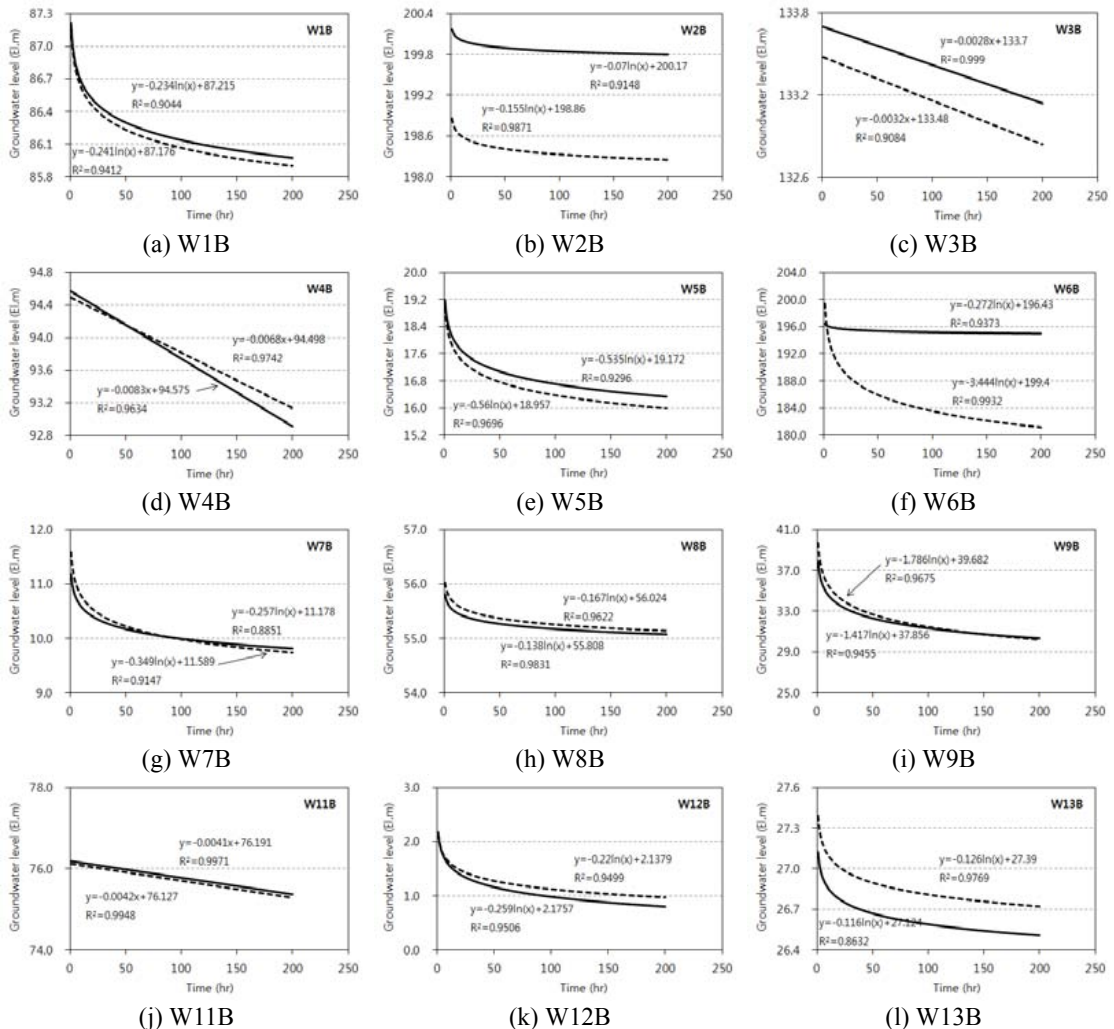


Fig. 7. Recession curves for groundwater level's time series for two cases: before earthquake (dot line: before earthquake, solid line: after earthquake).

다. 유형 (1)은 충적층 지하수 지역에서 지진에 의한 퇴적물의 압축 고화에 의한 상승 및 부분적인 배수 작용에 의하여 나타나는 형태로 해석되었으며, 유형 (3)은 퇴적암내 균열대에서 나타나는 현상으로서, 지진에 의한 투수성의 증가로 지하수의 배출이 발생한 것으로 해석되었으며, 유형 (4)는 외부 지표 수원에 인근한 지하수 관측정으로서 지진에 의한 균열의 수리전도도 증가로 지표수가 유입되어 지하수위가 증가하고 이후 회복 또는 지속되는 현상으로 설명한 바 있다. W2B, W4B, W6B는 유형 (1) 또는 (4)에 가까운 변화를 보이며, W13B는 유형 (3)과 유사한 특성을 나타내고 있어, 상기 기작들이 작용하는 것으로 추정되며 추가적인 접근이 필요하다.

또한, 지진에 의하여 상승된 지하수위의 하강은 일반적으로 아래 경험식으로 표현된다(Wang *et al.*, 2004).

$$\ln(h) = a - bt \quad (1)$$

여기에서, $b \approx \pi^2 \frac{\kappa}{4L^2}$ 으로서, a 는 절편, t 는 시간, κ 는 수리확산도, L 은 대수층의 두께에 해당한다. κ 는 수리전도도 k 로부터 $\kappa = \frac{k}{S_s}$ 로 표현되며, S_s 는 비저류율(specific storage)에 해당한다. 이 식에서 보듯이, 응력에 의한 수리전도도의 감소는 수리확산도의 감소를 가져오게 되어 b 값이 증가하므로 시간이 경과함에도 높은 수위를 유지하는 형태가 나타나게 된다. 이는 Coulomb 응력장의 trigger zone에서의 응력이 수리확산도의 감소를 초래하고 이로 인하여 장시간이 경과함에도 수위가 회복되지 않는 요인을 제 공하는 것으로 보인다. W2B, W4B, W6B에서의 지진 이후 높은 지하수위가 유지되는 것은 공극압의 변화가 수리전도도의 감소를 초래하여 나타나는 것으로 추정할 수 있다.

이상 1시간 간격 측정 자료를 활용한 분석 결과를 종합해 보면, W2B, W4B, W6B, W13B는 지진의 영향이 나타난 관측정으로 평가될 수 있으며, 이 중 W2B, W4B, W6B는 Coulomb stress 분포의 trigger zone 내에 위치하는 공통점을 갖고 있다. 아울러, W3B, W5B, W8B, W12B는 시계열도 상에서는 뚜렷한 지진 영향이 보이지 않으나 지진 이후 peak의 변화, 감쇠곡선의 기울기 감소 등 미세한 지진 영향의 가능성이 존재하여 추가 정밀 연구가 필요하며, W1B, W7B, W9B, W11B

은 지진 영향이 거의 없는 관측정으로 추정되었다.

한편, Sumatra 지진($M=9.0$)시 일본의 11개 관측정에서의 초~분 단위의 조밀한 관측 자료를 활용하여 지하수위 변화를 분석한 결과, 8개 관측정에서는 수위 상승, 3개 관측정에서는 하강이 나타났는데, 수위 변동 패턴을 완만한 형태의 변동과 짧은 시간내에 상승-하강의 반복(Oscillation) 변동으로 분류한 바 있다(Kitagawa *et al.*, 2006). 2011년 Tohoku 지진($M=9.0$)시 중국 전역의 216개 관정(대부분 1분 간격 측정)에서 측정된 지하수위의 평가 결과에서도, 73개소는 상승이나 하강 후 변화된 수위가 수 일 내지 수 개월간 유지되는 특성이며, 85개소는 지진 기간 동안 상하로 주기적으로 변화를 보이는 반복 진동 특성으로 대분되었다(Yan *et al.*, 2014). 본 연구에서는 1 시간 간격의 측정 자료를 사용한 관계로 짧은 시간 내의 지하수위 변화에 대한 데이터가 확보되지 않아 미세한 변동이나 주기성 변화(Oscillation)에 대한 평가는 수행하기 어려운 한계점이 존재하였다.

또한, Tohoku 지진($M=9.0$, 2011년) 연구에 의하면 지진에 의한 지하수위의 변동이 진앙과의 거리, 지질 특성, 수위 변동의 형태(step rise or falling, oscillation 등) 등에 따라서 통계적으로는 유의성을 보이지 않는 것으로 분석된 바 있어, 지진에 의한 지하수위의 변동 기작은 기 제시된 이론 보다 복잡한 것으로 평가되었으며 지속적인 연구가 필요함을 피력한 바 있다(Yan *et al.*, 2014). 본 연구에서도 일부 관측정에서 지진에 의한 지하수위의 계단상 변동 및 지속 유지 현상이 발생하였다는 점은 도출되었으나, 구체적인 발생 기작에 대해서는 추가적인 현장 조사 및 분석이 필요한 실정이다.

향후 연구에서는, 경주 지진 기간 동안에 발생한 수차례의 강우에 의한 지하수위 상승 영향을 분리한 시계열 자료의 분석, 각 관측 지점별로 상이한 지층 및 수리적 특성을 고려한 분석, 미세 변동에 대한 분석, 지진에 의한 volumetric strain 분석 결과와의 비교 분석 등을 통하여 보다 정밀한 평가가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 2017년 국토교통기술촉진 연구사업의 연구비 지원(과제번호 17CTAP-C129727

-01)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bower, D.R. and Heaton, K.C., 1978, Response of an aquifer near Ottawa to tidal forcing and the Alaskan earthquake of 1964. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15, 331-340.
- 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.
- Chia, Y.P., Wang, Y.S., Wu, H.P., Chiu, J.J. and Liu, C.W., 2001, Changes of groundwater level due to the 1999 Chi-Chi earthquake in the Choshui river fan in Taiwan. *Bulletin of Seismological Society of America*, 91, 1062-1068.
- Ge, S. and Stover, S.C., 2000, Hydrodynamic response to strike- and dip-slip faulting in a half-space. *Journal of Geophysical Research*, 105, 25513-25524.
- Hong, T.K., Lee, J., Kim, W., Hahm, I.K., Woo, N.C. and Park, S., 2017, The 12 September 2016 M_L 5.8 mid crustal earthquake in the Korean Peninsula and its seismic implications. *Geophysical Research Letters*, 44, 3131-3138.
- Jónnson, S., Segall, P., Pedersen, R. and Björnsson, G., 2003, Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients. *Nature*, 424, 179-183.
- Kim, G.B., Son, Y.C., Lee, S.H., Jeong, A.C., Cha, E.J. and Ko, M.J., 2012, Understanding of surface water-groundwater connectivity in an alluvial plain using statistical methods. *The Journal of Engineering Geology*, 22, 207-221 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.S., Kim, T., Kyung, J.B., Cho, C.S., Choi, J.H. and Choi, C.U., 2017, Preliminary study on rupture mechanism of the 9.12 Gyeongju Earthquake. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 407-422 (in Korean with English abstract).
- 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, 13 073-13 082.
- Kitagawa, Y., Koizumi, N., Takahashi, M., Matsumoto, N. and Sato, T., 2006, Changes in groundwater levels or pressures associated with the 2004 earthquake off the west coast of northern Sumatra (M_{9.0}). *Earth Planets Space*, 58, 173-179.
- Koizumi, N., Kitagawa, Y., Matsumoto, N., Takahashi, M., Sato, T., Kamigaichi, O. and Nakamura, K., 2004, Preseismic groundwater level changes induced by crustal deformations related to earthquake swarms off the east coast of Izu Peninsula, Japan. *Geophysical Research Letters*, 31, L10606, doi: 10.1029/2004GL019557.
- Lee, H.A., Kim, M., Hong, T.K. and Woo, N.C., 2011, Earthquake observation through groundwater monitoring: A case of M_{4.9} Odaesan earthquake. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16, 38-47 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., 2016, Gyeongju earthquakes recorded in daily groundwater data at national groundwater monitoring stations in Gyeongju. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 21, 80-86 (in Korean with English abstract).
- Leggett, R.M. and Taylor, G.H., 1935, Earthquakes instrumentally recorded in artesian wells. *Bulletin of Seismological Society of America*, 25, 169-175.
- Matsumoto, N. and Roeloffs, E., 2001, Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan - II. Possible mechanism inferred from time-varying hydraulic properties. *Geophysical Journal*, 155, 899-913.
- Roeloffs, E., 1998, Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 103 (B1), 869-889.
- 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., 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 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., Wang, C.H. and Kuo, C.H., 2004, Temporal change in groundwater level following the 1999 (M_w 7.5) Chi-Chi earthquake (1999), Taiwan. *Geofluids*, 4, 210-220.
- Woo, N.C., Piao, J., Lee, J.M., Lee, C.J., Kang, I.O. and Choi, D.H., 2015, Abnormal changes in groundwater monitoring data due to small-magnitude earthquakes. *The Journal of Engineering Geology*, 25, 21-33 (in Korean with English abstract).
- Yan, R., Wöith, H. and Wang, R., 2014, Groundwater level changes induced by the 2011 Tohoku earthquake in China mainland. *Geophysical Journal International*, 199, 533-548.

Received : November 27, 2017

Revised : December 21, 2017

Accepted : December 27, 2017