

경주 국가지하수관측소 일자료로 본 경주지진 영향

이진용^{1,2*}

¹강원대학교 지질학과

²강원대학교 크리티컬존선도연구실

Gyeongju Earthquakes Recorded in Daily Groundwater Data at National Groundwater Monitoring Stations in Gyeongju

Jin-Yong Lee^{1,2*}

¹Department of Geology, Kangwon National University

²Critical Zone Frontier Research Laboratory, Kangwon National University

ABSTRACT

Earthquakes of *M5.1*, *M5.8* and *M4.5* occurred in September 12 and 19, 2016 respectively in Gyeongju, Gyeongbuk Province. These earthquakes inflated fears of people and highlighted necessity of detailed countermeasures because we have considered our country is safe to earthquakes. In the meanwhile, earthquake also impacts groundwater and thus it was recently reported that the Gyeongju Earthquakes affected groundwater there. This study evaluates daily groundwater data collected from five national groundwater monitoring stations (Geoncheon, Sannae, Oedong, Yangbuksin, Cheonbuk) in Gyeongju. The analysis revealed that only groundwater level of bedrock monitoring well hosted in andesite exhibited earthquake impact while no wells in the other four stations hosted in sedimentary rocks showed substantial responses to the earthquakes. This may be derived from the difference of seismic velocity of hosting rocks as well as epicenter distance. Special interest on groundwater monitoring is required to predict earthquakes as precursory phenomena.

Key words : Earthquake, Precursory phenomena, Groundwater level, National Groundwater Monitoring Station, Gyeongju

1. 서 론

2016년 9월 12일과 19일 경상북도 경주시 일대에서 각각 *M5.1*, *M5.8*과 *M4.5*의 지진이 발생하였다. 이로 인해 경주 시민뿐만 아니라 전국에서 건물의 흔들림 등을 경험하였고 상당한 공포를 느꼈다. 특히 경주와 울산, 부산 인근에는 다수의 원자력발전소가 있어 그 두려움은 더욱 증폭되었다. 그 동안 우리나라는 다수의 강한 역사지진(>*M5.0*)에도 불구하고(Kyung and Lee, 1988), 비교적 최근에 상당 규모의 지진이 매우 제한적이었으므로 일본과 달리 지진의 안전지대로 인식해왔다. 그러나 이번 경주지진으로 우리의 안이함에 대한 경종을 울리는 계기가 되었으며 내진설계, 지진모니터링 등 상시적인 지진 대비가 필요함을 주지시켰다.

흔히 지진이 발생할 때는 평소와 다른 자연적 현상, 지구자기장 변동, 지하수의 변화, 그리고 동물의 특이적 행동 등 여러 가지 전조현상(precursory phenomena)이 있다고 한다(Ji et al., 2011; Woo et al., 2015). 물론 여기에는 경험적, 과학적인 것도 있으며 일부는 그 근거가 부족한 것들도 다수 있다. 이번 경주지진과 관련하여도 국민들 사이에 상당히 많은 전조현상 관련 이야기들이 회자되어 혼란이 있기도 하였다. 만약 전조현상을 근거로 지진의 발생시기와 장소를 어느 정도 신뢰성 있게 예측할 수 있다면 이는 인류사에 매우 획기적인 공헌이 될 것이다. 그러나 아직까지 전 세계 과학계의 상당한 노력에도 불구하고 실질적인 진전이 있다고 보기는 어렵다.

지진은 기본적으로 지하의 응력변화로 발생하는 것이며 순식간에 일어나기 보다는 응력의 점진적 축적과 그리고

*Corresponding author : hydrolee@kangwon.ac.kr

Received : 2016. 10. 10 Reviewed : 2016. 10. 17 Accepted : 2016. 11. 18

Discussion until : 2017. 2. 28

단기간의 방출에 연관되므로(Kyung et al., 2007) 이는 지하수에도 지진 전후에 영향을 줄 것이다. 수리지질학자들에게 널리 알려진 사실로 지진이 도래할 경우 자연방사성 물질인 라돈(^{222}Rn)의 토양과 지하수내 농도가 크게 상승하기도 하고(Hauksson, 1981; Richon et al., 2003; Oh and Kim, 2015), 또 지하수위도 평소와 다른 상승 혹은 하강을 유발하기도 한다(Jeon et al., 2011; Lee et al., 2011; Woo et al., 2015). 그러나 이런 과학적 성과에도 불구하고 이들 연구는 지진이 실제로 발생한 후에 확인 혹은 검증성격의 결과론적인 해석이라는 한계를 가지고 있으며 해당 지역의 지질학적 조건에 따라 매우 다르게 나타날 수 있다.

한편 최근 경주지진 후에 언론은 경주에 있는 국가지하수관측소의 지하수위에 특이적 변동이 나타났다고 보도하고 있다. 본 연구에서는 국토교통부와 한국수자원공사(K-water)가 운영하고 있는 경주시의 5개 국가지하수관측소에서 얻은 일평균(혹은 일일 특정시각) 지하수자료(일반인에게 홈페이지에 제공하는 수위, 수온, 전기전도도)에 대하여(시간측정 자료의 해석은 이번 연구의 대상이 아니다)

이번 지진에 영향을 받아 어떤 변화가 있었는지를 살펴보았다.

2. 연구지역과 방법

관심대상인 경주지진은 2016년 9월 12일 오후 7시 44분에 경주시 남서쪽 9 km 위치에서 규모 5.1로 전진이 발생하였고 이어 8시 32분에 남남서쪽 9 km 위치에서 본진인 규모 5.8이 발생하였다(Fig. 1). 그리고 이들 지진 후 일주일 후인 9월 19일 오후 8시 33분 경주시 남남서쪽 11 km 지점에서 규모 4.5의 여진이 발생하였다(KMA, 2016). 진앙이 남남서 방향으로 진행하고 있으며 이는 양산단층과 연관된 것으로 알려지고 있다. 한편 이 지진으로 인해 서울, 춘천 등 전국에서 흔들림이 감지되었으며 경주에서는 다수의 건물에 직접적 피해가 발생하였다. 무엇보다도 우리나라 원자력발전소의 대부분이 이 부근에 있다는 사실로 인해 극도의 공포를 느끼기도 하였다. 이후 정부에서는 지진에 대한 보다 면밀한 감시와 내진설계 등의 노력을 강구하고 있다.

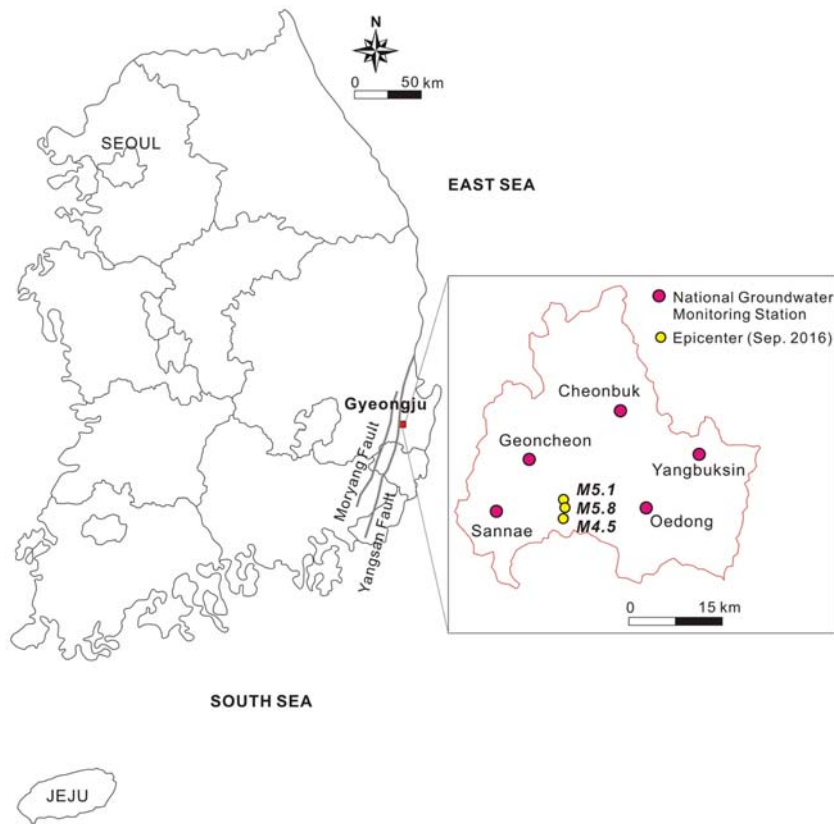


Fig. 1. Locations of five National Groundwater Monitoring Stations of this study in Gyeongju. Epicenters of three earthquakes and associated faults are also shown (KMA, 2016).

Table 1. Specifications of National Groundwater Monitoring Stations in Gyeongju of this study (A: alluvial well, B: bedrock well, T: transmissivity, K: hydraulic conductivity, R: approximate distance from the epicenter of the *M*5.8 earthquake). Data are from the National Groundwater Information Center (www.gims.go.kr)

Name	Elevation (m, amsl)	Well depth (m)	Hosting rock	T (m ² /day)	K (cm/sec)	R (km)	Site explanation
Geoncheon (B)	89.09	70	Shale	0.43	9.93×10^{-6}	10.4	On stream bank, very close to stream (30 m width)
Geoncheon (A)	89.07	12	Sand/gravel	1.68	2.79×10^{-4}		
Sannae (B)	200.04	65	Andesite	2.39	5.32×10^{-5}	13.2	Within elementary school, 300 m to stream (70 m width)
Sannae (A)	200.04	6.8	Pebble	0.81	1.59×10^{-4}		
Oedong (B)	96.8	100	Mudstone	5.04	5.82×10^{-6}	11.7	On stream bank, very close to stream (10 m width)
Oedong (A)	96.8	12.5	Sand/gravel	6.2	8.56×10^{-5}		
Yangbuksin (B)	136.22	73	Mudstone	0.05	1.78×10^{-4}	20.3	Near highway, 140 m to stream (22 m width)
Yangbuksin (A)	136.22	26	Sand/gravel	-	1.82×10^{-4}		
Cheonbuk (B)	42.38	60	Conglomerate	2.43	5.85×10^{-5}	16.1	Within township office, 210 m to stream (10 m width)
Cheonbuk (A)	41.38	8.8	Pebble	2.14	5.16×10^{-5}		

1994년 제정된 지하수법에 따라 국가에서는 전국의 지하수의 변동을 감시하고 이를 지하수관리정책에 반영하기 위하여 국가지하수관측소를 운영하고 있다(Lee et al., 2007). 2016년 현재 402개소에 이르며 평균 20 m의 총적 관측정과 평균 70 m 깊이의 암반관측정으로 구성되어 있다(Lee and Kwon, 2016). 각 관측정에는 자동측정센서가 설치되어 있어 매 시간마다 지하수위, 수온 및 전기전도도를 자동으로 측정하며 이는 실시간으로 한국수자원공사 국가지하수 관측망 관리시스템 서버로 전송된다. 이렇게 수집한 지하수 자료는 국가지하수정보센터 홈페이지(www.gims.go.kr)를 통해 일반국민에게도 공개되고 있다. 이때 제공되는 자료는 일자료(daily data)로 매시간 측정된 자료를 평균한 값이다. 본 연구에서는 이들 홈페이지에 공개된 자료에 대하여 분석하였다. 일반적으로 지진에 대한 지하수 영향은 비교적 짧은 시간에 나타나(Jeon et al., 2011) 시간 자료 혹은 그 이하의 측정간격 자료에 대한 분석이 필수적이지만 일반국민에게 공개되는 일자료에도 이와 같은 지진영향(수위 등의 비이상적인 변화)이 나타나는지 알아보는 것이 본 연구의 목적이다. 특히 최근에 보도된 이 자료에 대한 지진영향(비이상적인 수위 상승) 언급(Kookmin Ilbo, 2016)에 대해 살펴보는 것도 하나의 목적이다.

이를 위해 경주시에 설치되어 있는 5개 국가지하수관측소(경주건천, 경주산내, 경주외동, 경주양북신, 경주천북)에 대하여 2016년 9월 1일부터 30일까지의 일일 지하수위, 수온 그리고 전기전도도 자료를 상기 국가지하수정보센터 홈페이지에서 수집하였다. 이들 관측소는 12일과 19일에 발생한 경주지진의 진앙으로부터 약 10~20 km 내에 위치한다(Fig. 1, Table 1). 각 관측소에는 총적관측정과

암반관측정이 모두 설치되어 있으며 각각 6.8~26 m, 60~100 m의 설치 깊이를 보인다. 기반암은 경주산내 관측소의 안산암을 제외하고는 모두 셰일, 이암, 역암 등 퇴적암에 설치되어 있다. 관측정 주변의 수리전도도는 10^{-4} ~ 10^{-6} cm/sec의 범위를 보이며 이는 총적대수층으로는 비교적 낮은 값이지만 암반대수층에 나타나는 범위로는 전형적이다(Lee and Lee, 2000).

3. 결과 및 토론

Fig. 2는 5개 지하수관측소의 일일 지하수위(해발고도가 아닌 지표면 아래 깊이로 표시함, depth to water)를 최인접 강우관측 자료와 함께 나타낸 것이다. 산내와 건천 관측소는 9월 2일과 3일의 경우 각각 65.5 mm, 90.5 mm의 강우에 대해 전형적인 수위상승을 보이다 다시 낮아지는 양상을 보인다(Fig. 2A). 이후 소량의 강우에 대해서는 수위반응이 크게 나타나지는 않았다. 건천관측소는 총적과 암반관측정이 수리적 연결성이 탁월하여 거의 동시적이며 동일한 수위반응을 보이지만 산내관측소는 총적 관측정은 강우와 동시 수위상승 반응을 보이는 반면 암반 관측정의 경우 강우현상에 대한 약간의 지연반응을 보이고 있다. 한편 외동관측소는 산내 및 건천 대비 1.7~1.8 배의 비(108.6 mm, 163.7 mm)가 내렸지만 수위상승은 비교적 미미하였다(Fig. 2B). 산내관측소와 비교하면 상부 불포화대의 두께가 두 배 정도 두꺼워 강우신호의 전달과 정에서 저감이 발생하였기 때문으로 볼 수 있다. 그러나 동일 강우사상(rainfall event)에 대하여 상하류 여부, 강우 직전의 불포화대의 토양수분, 하천과의 인접성에 따라서 수위반응은 매우 다를 수 있으며 또 강우사상에 대한 수

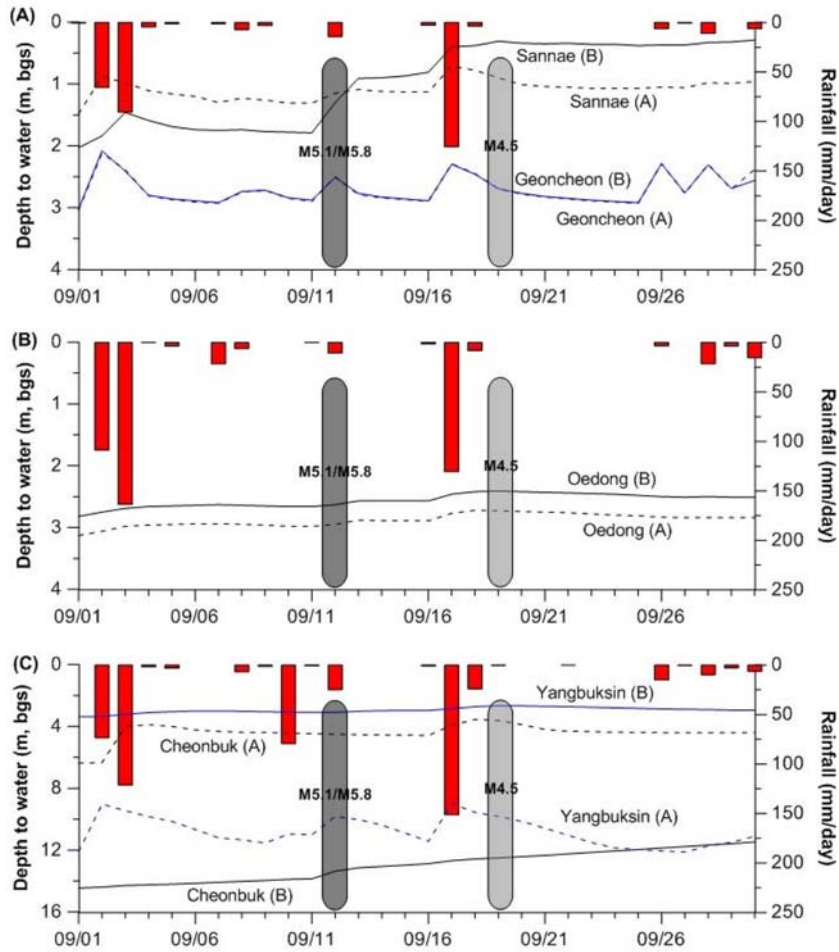


Fig. 2. Groundwater levels at five monitoring stations in Gyeongju for September 2016 (A: alluvial well, B: bedrock well). The red bar indicates daily rainfall and dates of earthquakes are also marked.

위상승은 선형적이지 않다(Lee et al., 2005). 양북신과 천북 관측소의 경우 강우는 위 두 경우의 중간쯤(73.4, 121.2 mm)에 해당하지만 총적관측정의 수위상승 반응은 가장 크다(>2 m; Fig. 2C). 이는 다른 관측소와 비교하여 상부 불포화대의 가장 큰 두께(5~12 m)를 고려할 때 특이적인 현상이다. 보다 특이한 거동은 양북신 암반관측정의 경우 강우에 수위가 상승이 하기는 하지만 상당이 더디며 상대적으로 미미하다는 것이다(그럼에도 9월 1일과 9월 30일 지하수위차는 43 cm임). 양북신 암반관측정의 수위가 총적층보다 높은 곳으로 보아 암반층은 피압상태이며 상부 총적대수층과 분리되어 강우의 직접적 함양은 제한적인 것으로 보인다. 천북 암반관측정은 양북신 암반관측정과 비슷한 거동을 보이는데 9월 1일 강우사상 이후 꾸준하게 수위가 증가하며 강우에 대하여 즉각적인 반응은 보이지 않는다. 이는 지하수위가 상대적으로 매우 낮으며 이로 인해 직접적인 강우의 함양은 작으며 상

대적으로 원거리에서의 지연된 함양이 주로 영향을 주는 것으로 볼 수 있다.

M5.1의 전진과 M5.8의 본진이 발생한 9월 12일의 경우 당일 내린 비(14, 10.5, 24.8 mm)로 인해 해석이 좀 복잡하다. 즉 강우영향과 지진영향을 구분하는 것이 쉽지 않다는 것이다. 건천관측소의 총적과 암반관측정의 지하수위는 특이적 거동없이 강우에 대한 정상적인 반응으로 수위가 상승하였다(총적 40 cm, 암반 37 cm) 다시 낮아졌다. 외동과 양북신 관측소의 지하수위도 대체적으로 강우에 대한 반응으로 수위상승(외동 총·암 공히 3 cm 상승, 양북신 총·암 118, 1 cm)을 보였다가 회복되는 것으로 보인다. 그런데 산내관측소의 경우 상대적으로 특이적 거동을 보였다. 총적관측정의 경우 16 cm의 수위상승이 있었고 다시 낮아지는 경향을 보였는데 이는 정상적인 강우 반응으로 볼 수 있다. 그러나 암반관측정의 경우 동일 강우에 대해 49 cm의 수위상승이 있었고 이후 무강우에도

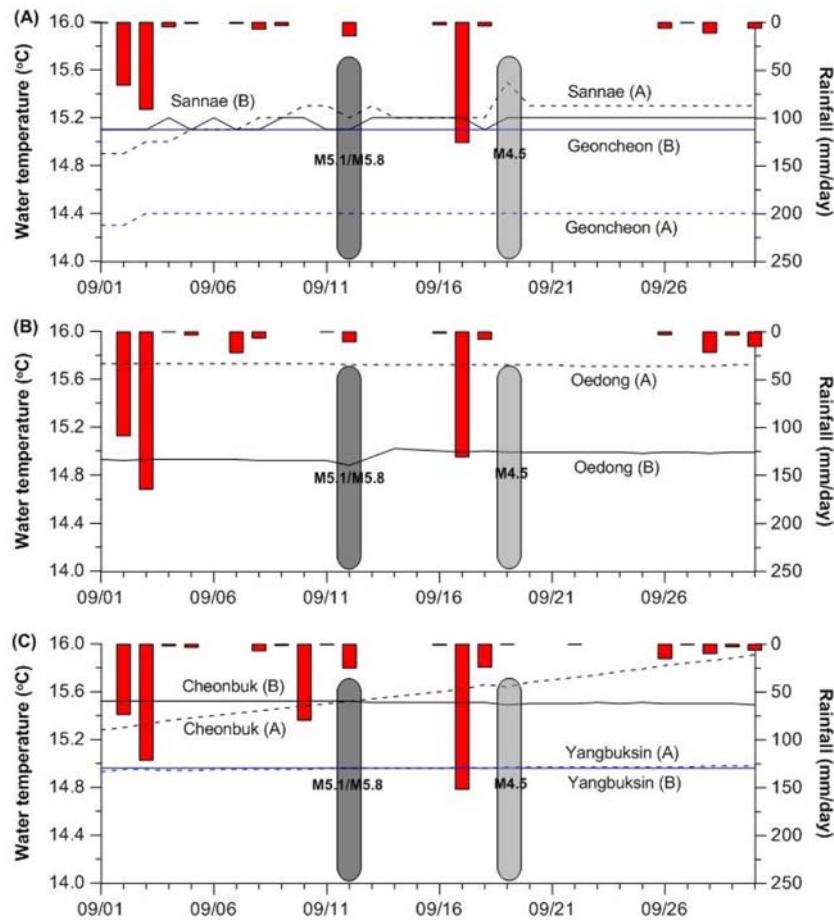


Fig. 3. Groundwater temperatures at five monitoring stations in Gyeongju for September 2016 (A: alluvial well, B: bedrock well). The red bar indicates daily rainfall and dates of earthquakes are also marked.

불구하고 추가적인 수위상승이 계속되었다(Fig. 2A).

이는 매우 특이한데 일반적으로 동일 강우에는 총적층 수위가 암반층 수위보다 더 상승하는데(Lee and Lee, 2002), 여기서는 반대의 현상을 보였다. 그러므로 암반관측정의 33(=49-16) cm 이상의 수위변동은 통상적인 강우 반응에 의한 것이 아닌 것으로 보아야 한다. 여기서는 이 당시 발생한 지진의 영향으로 해석할 수 있으며 암반 피압대수층이 총적 자유면대수층에 비해 지진 영향에 더욱 민감하다(Chia et al., 2008; Woo et al., 2015)는 사실로부터 합리적 추론으로 볼 수 있다. 그 동안 우리나라에서도 지진에 의한 지하수반응 연구로 대규모 일본지진과 소규모 국내지진에 대한 영향분석이 적지 않았다(e.g., Jeon et al., 2011; Lee et al., 2011; Lee et al., 2012; Woo et al., 2015). 이들에 의하면 지진에 대한 지하수위 반응은 어떤 상승과 하강의 방향을 특정할 수 없으며 다만 이상적 변동을 나타낼 뿐이다.

한편 M5.8 이후 일주일이 지난 시점에 M4.5의 여진이

발생하였다. 그 사이의 지하수위 변동을 살펴보면 모든 총적관측정은 지진의 징후 혹은 영향보다는 대체로 강우에 대한 정상적인 반응과 회복으로 보인다. 암반관측정의 경우 크기의 차이는 있지만 대체로 본진 이후에도 수위가 하강하지 않고 오히려 상승하는 경향을 보였으며 M4.5 여진 이후에도 상승하거나 혹은 상승된 상태를 거의 유지하고 있다. 이는 총적관측정과 매우 대비되는 현상이다. 그러나 이러한 현상을 최근에 보도된 것과 같이 응력이 제대로 해소되지 않은 결과(더군다나 이를 추가적인 지진 발생 가능성으로)로 해석하는 것은 다소 무리가 있어 보인다. 일반적으로 총적관측정은 강우에 대하여 빠른 반응과 빠른 해소를 보이지만 암반관측정의 경우 강우반응이 조금 느리지만 올라가서 내려오는 것은 더욱 오래 걸리는 것이 특징이다.

그런데 흥미로운 것은 검토한 5개의 지하수관측소의 수위 자료 중에서 오로지 산내 암반관측정의 지하수위만 뚜렷이 구분되는 특이거동을 보인다는 것이다. 암반관측정

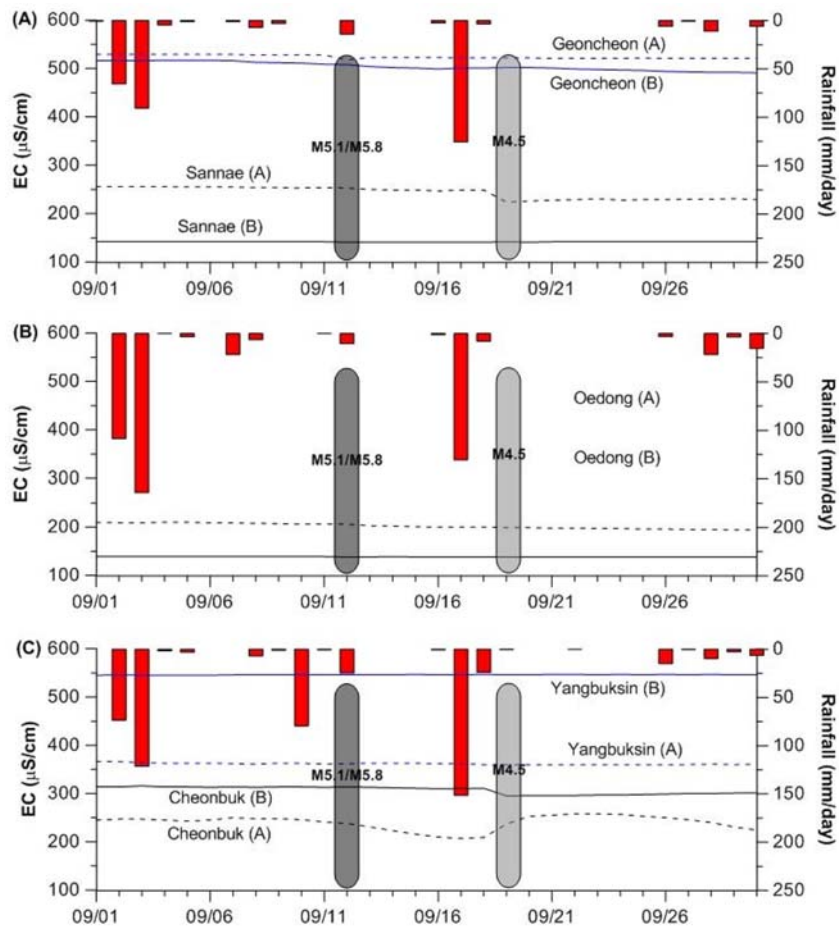


Fig. 4. Electrical conductivities of groundwater at five monitoring stations in Gyeongju for September 2016 (A: alluvial well, B: bedrock well). The red bar indicates daily rainfall and dates of earthquakes are also marked.

이 층적층과 달리 뚜렷한 반응을 보이는 것은 지진과의 전파특성(밀도가 크고 단단한 암석의 경우 빠른 속도)과 피압정도 차이로 추론되나 진앙거리가 거의 비슷한 3개 관측소(건천, 산내, 외동; 언론에 나온 것처럼 산내가 가장 가깝다고 보기도 어렵고 거리가 너무 비슷해 그렇게 이해하는 것은 합리적이지 않아 보임)의 다른 거동은 이해하기 쉽지 않다. 흔히 국지적인 지질학적 조건에 따라 지진반응이 다른데 다른 관측소는 퇴적암이 기반암이며 산내관측소는 안산암으로 되어 있다는 것이 차이로 일반적으로 화성암이 셰일, 사암 등과 같은 퇴적암보다 지진파 속도가 빠르다(Barton, 2007)는 차이에 기인한 것이 아닌지 추정될 뿐이다.

Fig. 3과 4는 수온과 전기전도도 변화이다. 산내 층적관측정의 경우 지진 전후로 미미한 온도 상승(-0.2°C)이 있지만 빠르게 해소되며 이는 강우침투의 영향으로 보인다. 다른 암반 및 층적관측정은 강우에도 불구하고 수온변화

는 거의 없거나 미미하며 지진의 의한 영향으로 볼 만한 변동도 거의 발견되지 않았다. 다만 외동 암반관측정의 경우 본진 당시 인지할만한 수온변동이 있었지만 이것이 강우침투에 의한 것인지 지진 영향인지는 판단하기 어렵다. 전기전도도의 경우에도 수온과 마찬가지로 특이한 변동을 발견하기 어렵다(Fig. 4). 본진 당시 전기전도도의 변화를 보이지 않았으며 M4.5 여진 시 산내 및 천북 층적관측정의 전기전도도의 일부 저하는 강우 침투에 의한 것으로 볼 수 있다.

4. 결 론

9월 12일과 19일에 발생한 경주지진 시 인접한 5개 국가지하수관측소에서 수집한 일일 지하수위, 수온 그리고 전기전도도 자료를 살펴보았다. 자료를 분석한 결과 강우 사상과 중첩되어 지진영향의 구분이 쉽지 않았지만 다른

관측소와 달리 경주산내 관측소 암반지하수관측정의 수위는 일부 지진의 영향을 받은 것으로 보인다. 이는 진앙과의 지리적 근접성 뿐만 아니라 해당 지역의 지질이 안산암으로 다른 관측소의 퇴적암과 달리 보다 치밀한 지질공학적 특성에 따른 것으로 사료된다. 그 외 수온과 전기전도도는 유의할 만한 지진영향을 판단하기는 쉽지 않아 보인다. 일평균 자료는 지진영향을 감추어(masking) 버릴 우려가 있으므로 보다 정확한 평가를 위해서는 시간자료 혹은 그 이하의 시간간격 자료에 대한 분석이 필요하다. 향후 지하수 모니터링을 통한 지진의 감시와 예측은 수리지질학의 도전적 분야인 것은 분명하다.

사 사

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2015R1A4A1041105). 좋은 수정의견을 주신 편집위원님과 두 분의 심사위원님께 감사의 말씀을 드립니다.

References

- Barton, N., 2007, Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy, Taylor & Francis, London, 729 p.
- Chia, Y., Chiu, J.J., Chiang, Y.H., Lee, T.P., Wu, Y.M., and Horng, M.J., 2008, Implications of coseismic groundwater level changes observed at multiple-well monitoring stations, *Geophy. J. Int.*, **172**, 293-301.
- Hauksson, E., 1981, Radon content of groundwater as an earthquake precursor: evaluation of worldwide data and physical basis, *J. Geophy. Res.*, **86**, 9397-9410.
- Jeon, W.H., Kwon, K.S., and Lee, J.Y., 2011, Evaluation of groundwater level changes in Korea due to the earthquake in Japan (magnitude 9.0 in 2011), *J. Geol. Soc. Korea*, **47**, 695-706 (in Korean with English abstract).
- Ji, Y.S., Oh, S.H., Suh, B.S., and Lee, D.K., 2011, Restoration, prediction and noise analysis of geomagnetic time-series data, *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **32**, 613-628 (in Korean with English abstract).
- Kookmin Ilbo, 2016, Groundwater knew: 49 cm waterlevel rise on Gyeongju earthquake day, September 27, 2016 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2016, List of domestic earthquakes, <http://www.kma.go.kr> (in Korean).
- Kyung, J.B., Huh, S.Y., Do, J.Y., and Jo, D.R., 2007, Relation of intensity, fault plane solutions and fault of the January 20, 2007 Odaesan earthquake (ML=4.8), *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **28**, 202-213 (in Korean with English abstract).
- Kyung, J.B. and Lee, K., 1988, A statistical approach to the incomplete historic earthquake data of Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **24**, 388-396 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.A., Kim, M., Hong, T.K., and Woo, N.C., 2011, Earthquake observation through groundwater monitoring: A case of M4.9 Odaesan earthquake, *J. Soil Groundwater Environ.*, **16**, 38-47 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y. and Kwon, K.D., 2016, Current status of groundwater monitoring networks in Korea, *Water*, **8**, 168.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2000, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system, *J. Hydrol.*, **229**, 190-201.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2002, A comparative study on characteristics of waterlevel responses to rainfall in the two aquifer systems, *J. KoSSGE*, **7**, 3-14 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Yi, M.J., and Hwang, D., 2005, Dependency of hydrologic responses and recharge estimates on water-level monitoring locations within a small catchment, *Geosci. J.*, **9**, 277-286.
- Lee, J.Y., Yi, M.J., Yoo, Y.K., Ahn, K.H., Kim, G.B., and Won, J.H., 2007, A review of the National Groundwater Monitoring Network in Korea, *Hydrol. Proc.*, **21**, 907-919.
- Lee, S.H., Ha, K., Hamm, S.Y., and Ko, K.S., 2012, Groundwater responses to the 2011, Tohoku Earthquake on Jeju Island, Korea, *Hydrol. Proc.*, **27**, 1147-1157.
- Lee, S.H., Hamm, S.Y., Ha, K., Kim, Y.C., Cheong, B.K., Ko, K.S., Koh, G.W., and Kim, G.P., 2011, Analysis of groundwater level changes due to earthquake in Jeju Island (for the Indonesian earthquake with magnitude 7.7 in 2010), *J. Soil Groundwater Environ.*, **16**, 41-51 (in Korean with English abstract).
- Oh, Y.H. and Kim, G., 2015, A radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor, *Sci. Reports*, **5**, 13084.
- Richon, P., Sabroux, J.-C., Halbwachs, M., Vandemeulebrouck, J., Poussielgue, N., Tabbagh, J., and Punongbayan, R., 2003, Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994), *Geophy. Res. Lett.*, **30**, 1481.
- 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, *J. Engrg. Geol.*, **25**, 21-33 (in Korean with English abstract).