

1Hz 지하수 데이터를 활용한 중·소규모 지진으로 인한 지하수위 반응

이가현¹ · 이재민¹ · 박동규¹ · 김동훈¹ · 정재훈¹ · 이수형^{1*}¹한국지질자원연구원 지하수환경연구센터

Groundwater Level Responses due to Moderate·Small Magnitude Earthquakes Using 1Hz groundwater Data

Gahyeon Lee¹, Jae Min Lee¹, Dongkyu Park¹, Dong-Hun Kim¹, Jaehoon Jung¹, Soo-Hyoung Lee^{1,*}¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Groundwater Environment Research Center

ABSTRACT

Recently, numerous earthquakes have caused significant casualties and property damage worldwide, including major events in 2023 (Türkiye, M7.8; Morocco, M6.8) and 2024 (Noto Peninsula, Japan, M7.6; Taiwan, M7.4). In South Korea, the frequency of detectable and noticeable earthquakes has been gradually increasing since the M5.8 Gyeongju Earthquake. Notable recent events include those in Jeju (M4.9), Goesan (M4.1), the East Sea (M4.5), and Gyeongju (M4.0) since 2020. This study, for the first time in South Korea, monitored groundwater levels and temperatures at a 1Hz frequency to observe the responses in groundwater to moderate and small earthquakes primarily occurring within the country. Between April 23, 2023, and May 22, 2023, 17 earthquakes were reported in the East Sea region with magnitudes ranging from M2.0 to M4.5. Analysis of groundwater level responses at the Gangneung observation station revealed fluctuations associated with five of these events. The 1Hz observation data clearly showed groundwater level changes even for small earthquakes, indicating that groundwater is highly sensitive to the frequent small earthquakes recently occurring in South Korea. The analysis confirmed that the maximum amplitude of groundwater level changes due to earthquakes is proportional to the earthquake's magnitude and the distance from the epicenter. These findings highlight the importance of precise 1Hz-level observations in earthquake-groundwater research. This study provides foundational data for earthquake monitoring and prediction and emphasizes the need for ongoing research into monitoring the changes in groundwater parameters (such as aquifer characteristics, quantity/quality, and contaminant migration) induced by various magnitudes of earthquakes that may occur within the country in the future.

Key words: Groundwater level, 1Hz observation, Moderate and Small earthquakes, Earthquake magnitude, Epicentral distance

1. 서 론

전 세계적으로 수많은 인명피해와 물적피해를 발생시키는 M7.0 이상의 대규모 지진은 지속적으로 발생하고 있는 상황이다. USGS에 따르면 2000년부터 2023년까지 M7.0 이상의 지진은 약 257회 발생하였다(USGS, 2024). 최근에도 대규모 지진은 지속적으로 발생하고 있으며 2023년도에

발생한 튀르키예-시리아 지진(M7.8), 모로코 지진(M6.8), 아프가니스탄 지진(M6.3)으로 인해 수많은 사상자가 발생하였으며 2024년에는 한반도 주변에 위치하고 있는 일본 노토반도(M7.6)와 대만(M7.4) 해역에서 대규모 지진이 발생하였다. 국내에서도 2016년 경주지진(M5.8) 이후로 2017년 포항축발지진(M5.4), 2021년 제주지진(M4.9), 2022년 괴산지진(M4.1), 2023년 동해지진(M4.5), 2023년 경주지진(M4.0) 등 일반 시민들이 감지하고 느낄 수 있는 규모의 지진이 점차 발생하고 있는 추세이다.

최근에 M4.0 이상의 지진이 2000년 이후로 지속적으로 발생하고 있으며 이로 인해 국민적인 관심이 크게 증가하고 있다. 또한 2011년 3월에 발생한 동일본 대지진(M9.0) 이후 한반도에서의 지진 발생빈도가 증가하였다는 연구 결과가

주저자: 이가현, 인턴연구원

공저자: 이재민, 선임연구원; 박동규, 선임연구원;

김동훈, 책임연구원; 정재훈, 선임기술원

*교신저자: 이수형, 책임연구원

Email: rbagio@kigam.re.kr

Received : 2024. 07. 25 Reviewed : 2024. 08. 05

Accepted : 2024. 08. 19 Discussion until : 2024. 10. 31

보고되었다(Hong et al., 2015). 국내에서 중규모 지진뿐만 아니라 소규모 지진도 발생빈도가 증가하였다. 동일본 대지진 이후 2012년부터 2021년까지, M2.0 이상~3.0 미만의 지진이 937건, M3.0 이상~4.0 미만의 지진이 107건으로 발생하였다(KMA, 2024a).

지진이 발생하게 되면 정적응력(static stress)과 동적응력(dynamic stress; seismic wave) 에너지를 발생시키며(Lay and Wallace, 1995) 이러한 응력변화는 오래전부터 다양한 메커니즘을 통해 수문학적 및 수리지질학적인 변화를 야기시키며 지진학자들과 수리지질학자들에 의해서 많은 연구가 이루어져오고 있다(Wakita, 1975; Rojstaczer et al., 1992; Quilty and Roeloffs, 1997; Kitagawa and Koizumi, 2000; Jonsson et al., 2003). 지진에 의한 수리지질학적 변화로는 유체압력변화와 관련된 물리적 특성 변화(King et al., 1999; Chia et al., 2001; Roeloffs et al., 2003; Shi et al., 2007; Wang and Chia, 2008)와 지구화학적 특성 변화가 있으며 지진 또는 지진파의 영향으로 미소크랙 및 단열대에 분포하고 있는 미세입자들을 제거함으로써 새로운 수질 기원(newly source)의 지하수 유입과 물-암석 반응의 가속화 및 혼합(fluid-source switching or mixing)을 발생시켜 대수층 내 화학적 조성의 변화를 가져오기도 한다(Claesson et al., 2004; Charmoille et al., 2005; Claesson et al., 2007; Wang et al., 2012; Skelton et al., 2014).

또한, 지진이 발생함으로써 유발되는 동적 변형(dynamic strain), 즉 지진파(seismic wave)는 진앙지로부터 수천 km 떨어진 곳의 지하수 관정에 영향을 미치며 지진파가 통과함에 따라 발생한 압축과 팽창은 대수층과 관정의 상호작용으로 인해 지진파와 유사한 진동형태(Cooper et al., 1965; Liu et al., 1986; Roeloffs, 1998; Brodsky et al., 2003; Wang et al., 2009)로 관측이 되며 Hydroseismogram 이라고도 보고되었다(Kano and Yanagidani, 2006).

국내에서도 국내 및 국외 지진으로 인한 수리지질학적 변화에 관한 연구가 이루어지고 있다. 2011년에 발생한 동일본 대지진으로 국내 지하수 관정에서 지하수위 변화에 관한 연구가 보고되었으며(Jeon et al., 2011; Lee and Woo, 2012; Lee et al., 2013(a, b)) 경주지진으로 인한 지하수의 화학적 성분 변화에 대한 연구도 보고되었다(Lee, 2016; Lee et al., 2018). 이 외에도 국내에서 지진과 지하수와의 연관성에 관한 연구들이(Ok et al., 2010; Lee et al., 2011; Cheong et al., 2013; Yun et al., 2019) 지속적으로 수행되어 오고 있다. 또한 대규모, 중규모 지진뿐만 아니라, 소규모 지진 역시 지하수위 변동이 관측될 수 있다고 제시한 바 있다(Ramana et al., 2007).

하지만, 국내에서 발생하는 소규모 지진으로 인한 지하수 변화에 관한 연구는 부족한 실정이다. Woo et al.(2015)는 국내에서 발생빈도가 상대적으로 높은 M3.0 내외의 소규모 지진에 의한 지하수위 변화를 평가하고자 하였으며 국가지하수측정망의 1시간 자료를 이용하여 지진으로 인한 지하수 영향을 분석하였다. 이는 1시간 단위의 측정 자료를 통한 결과이기에, 정밀한 지하수위 변동을 측정하는 것은 어려움이 있다고 판단하였다. 중소규모 지진에 의한 지하수위 변동은 대체로 순간적으로 발생하며 그 지속 시간이 수 초~수 분 이내로 짧아, 시간 단위의 지하수위 측정만으로는 지하수위에 대한 지진의 영향을 명확히 파악하기 어렵다. 2011년 동일본 대지진이 발생하였을 때 국내 지하수관측정에서 지하수위 변화가 관측되었다. 하지만, 그 측정 간격이 1시간으로, 정확한 지하수위 변화를 관측하기 어려웠다(Jeon et al., 2011; Lee and Woo, 2012). 즉 지하수위 변동 발생 여부뿐만 아니라, 변동 발생 시점, 최대 변동 폭, 변동 지속 시간 등의 지표로 정밀히 확인하는 것에는 한계가 있다. 또한 지진의 규모 및 진앙지와 거리가 지하수 변동과의 상관성을 판단하기에는 장기적인 모니터링이 필요한 것으로 보고되었다. 따라서, 국내에서 주로 발생하는 소규모 및 중규모 지진으로 인한 수리지질학적 변화에 관한 지속적인 모니터링과 정밀한 관측 기술이 필요한 실정이다.

본 연구는 국내에서 상대적으로 발생빈도가 높은 소규모 및 중규모 지진에 의한 지하수위 반응을 평가하고자 수행되었으며 이와 더불어 지진 규모와 진앙지와 거리에 따른 지하수위 변동 양상도 평가하고자 하였다. 2023년 4월 23일~5월 22일 동안 동해안 인근 지역에서 발생한 M2.0 이상 M4.5 이하의 17회 지진을 대상으로 국내에서 최초로 1Hz 지하수 데이터를 활용하여 지진으로 인한 지하수위 변화를 분석하였다. 지하수 변화는 지하수의 수질 및 수량 변화 등을 초래할 수기에 이로 인해 지하 환경에 복합적인 문제를 발생시키는 것으로 보고되고 있다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 지진으로 인한 수리지질학적 영향을 평가할 수 있으며, 향후 지진에 따른 장기적인 지하수 모니터링이 필요성을 보여주고 다양한 연구 분야(지진, 수리지질, 지하환경 등)에 기초자료를 제공할 것으로 기대한다.

2. 연구지역 지질 및 방법

2.1. 연구지역 지질

지하수 관측정이 위치하고 있는 강릉지역의 기반을 이루는 암석에는 편마암, 고생대 퇴적암류, 화강암이 분포하고 있다. 강릉지역 북서부에는 선캄브리아기부터 편마암이 분포하고 있으며 남부에는 주로 고생대 퇴적암류가 분포하며 이 지역은

고생대 전기에 얽은 바다였고, 후기에는 육상의 저습지였다. 이에 따라 석탄-트라이아스기 평안계 퇴적층군은 천해성 및 육성 쇠설성 퇴적암이 석회암을 협재 되어있는 형태로 분포한다. 이후, 쥐라기에 한반도에 대규모 지각변동이 발생하여, 강릉 지역 심부에 화강암이 형성되었고 용기와 침식 과정을 통해 강릉 지역 지표면에 가장 넓게 분포하고 있다(Kihm and Hawng, 2011).

강릉 지역의 남동부와 남서단은 주로 고생대 퇴적암류가 분포하며, 이에 속하는 지역은 강동면과 옥계면 일대, 왕산면 남서단이다. 고생대 퇴적암류는 석회암, 셰일, 사암 등으로 이루어져 있으며, 그중에서 사암과 셰일을 주로 하는 평안누층군에는 석회암층이 분포하여 지하수의 산출 상태가 양호하게 나타난다. 지하수 관측정의 위치는 강릉시 옥계면에 위치하고 있어, 석회암층의 분포로 인해 겹겹이 석회암 공동이 발달하고 있다(Fig. 1). 석회암, 화강암 등과 같은 고결암은 지하수를 부존할 수 있는 능력을 가지고 있다. 그 중, 석회암은 고결정도나 공동의 발달에 따라 투수성의 차이를 보이긴 하지만, 일반적으로 그의 특성으로 인해 수량이 양호한 대수층이 발달하는 경우가 많다(Barbieri et al., 2005; Park et al., 2011). 따라서, 연구지역의 수리 지질은 지하에 존재하는 석회암 협재 퇴적암류와 단열로 인한 공극으로 인해 결정됨을 알 수 있다.

2.2. 지하수 관측정

본 연구에 활용된 지하수 관측정은 한국지질자원연구원 지하수환경연구센터에서 운영 중인 강릉 지하수 관측정이다. 전국에 총 11개의 관측소가 위치하여 지하수, 토양, 기상 요소를 관측한다(Fig. 2). 각각의 세부 관측 항목을 살펴보면 지하수는 지하수위, 온도, 전기전도도(EC: Electrical Conductivity), 토양은 수분함량, 온도 그리고 기상은 풍향, 풍속, 온도 및 습도 등이 있다. 본 연구에서는 동해 소규모 지진에 의한 지하수위 변동 특성을 파악하기 위해 지진 진앙지와 가장 근 거리에 위치하고 있는 강릉 관측정(GN-OBS: Gangneung-Observation Borehole Station)의 지하수위 데이터를 분석하였다. 지하수위 데이터는 국내에서 처음으로 관측된 1초 측정 간격 데이터를 활용하여 동해 근처에서 발생한 다양한 지진자료와 비교 분석하였다.

강릉 지하수관측정의 표고는 해발고도 8 m, 굴착심도는 150 m이며 관정 내부 보호를 위해 케이싱은 지표로부터 55 m까지 설치되었으며 지하수위는 2.65 m, 양수시험을 통해 양수량은 160 m³/day, 수위 강하는 0.77 m로 확인되었다.

2.3. 지하수위 분석

해안대수층에 위치한 지하수 관정은 다양한 요인(강우,

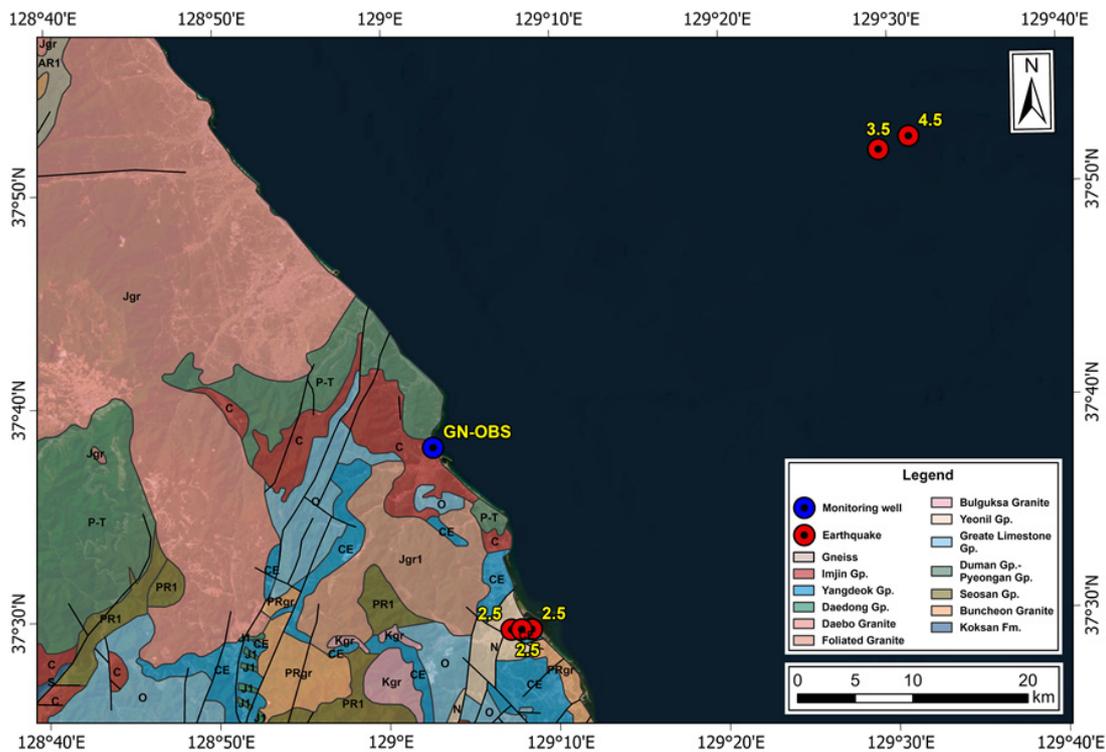


Fig. 1. Geology of study area and location map of East Sea earthquakes

지구조석, 해양조석, 주변 관정의 양수, 그리고 지진 등)들에 의해 영향을 받는다(Ferris, 1951). 이 중 지진에 의한 지하수위 변화 형태는 일반적으로 진앙지 주변의 압축과 팽창으로 인한 지하수위 상승과 하강하는 형태(Jonsson et al., 2003)가 있으며 지진파에 의한 대수층의 압력 변화로 인한 진동형태의 변화(Brodsky et al., 2003)가 있다. 지하수위 변동에서의 강우와 조석의 영향을 확인하고자, 강릉 지역 강우 자료(KMA, 2024b)와 지진 현황 자료(KMA, 2024c)를 이용하였다.

지진에 의한 지하수위 변화 형태를 파악하기 위해 일반적인 노이즈와 해양조석효과를 제거하는 필터링 기법을 활용하였다. 활용된 필터링 기법은 Lee et al.(2013a, 2017)에 의해 논문에서 활용된 기법으로 노이즈를 제거하여 진동형태의 지하수위 형태를 분석하였다. 활용된 필터링 기법에 적용된 수식은 다음 식 1과 같다.

$$X_t^* = X_t - \frac{X_{t-n} + \dots + X_t + \dots + X_{t+n}}{2n+1} \quad (\text{식 1})$$

여기서, X_t^* 는 필터링기법으로 얻은 값이며, X_t 는 t 시간에서의 측정된 값, n은 X_t 값 전후의 n 개의 수를 나타낸다.

지하수 관정은 다양한 요인(지구조석, 해양조석, 대기압 등)과 관정의 수리지질학적 특성으로 인해 각각의 관정마다 고유의 자연적인 지하수위 변동이 발생하게 된다. 본 연구에 활용된 기법은 관정의 자연적인 지하수위 변동을 필터링을 통해 수위변동이 “0” (Zero)에 가장 가까운 값을 활용하여 순간적인 지진 또는 지진파에 의한 지하수위 변화를 관측할 수 있다. 본 연구에서는 1Hz(1초 간격) 데이터를 활용하였으며 활용된 기법을 1Hz 데이터에 적용했을 때 지하수위 변화가 가장 명확하게 평가할 수 있는 n의 수를 결정하여 지하수위 변동을 분석하였다.

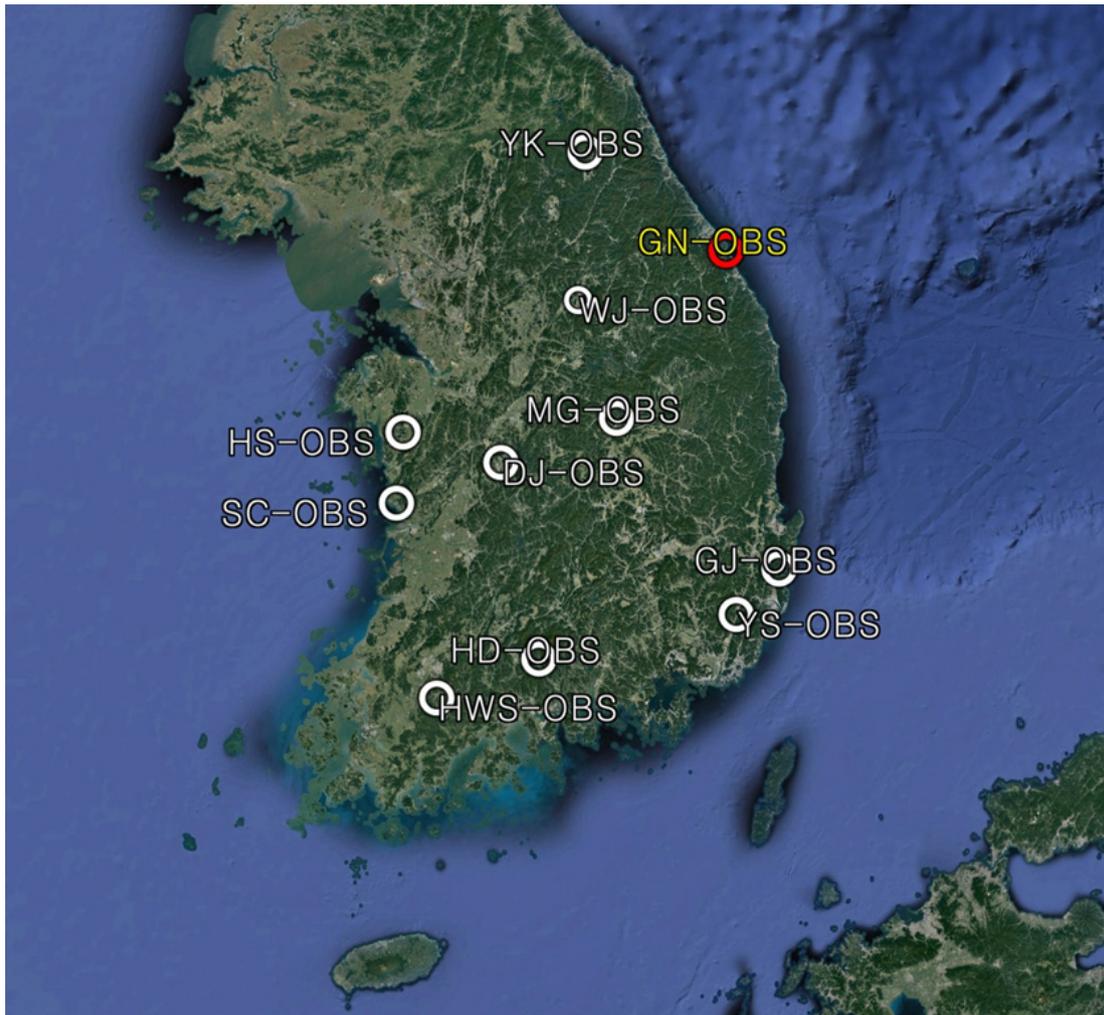


Fig. 2. Location map of groundwater monitoring wells (Gangneung: red)

Table 1. Records of earthquakes with a magnitude of 2.0 to 4.5 that occurred in the East Sea area from April 23, 2023 to May 22, 2023

No.	Earthquake	Mag. (M)	Dis. (km)	Latitude	Longitude	Location
1	2023-04-23 21:06:40	2.7	27	37.87 N	129.52 E	Sea area 52km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
2	2023-04-24 13:02:10	2.9	31	37.85 N	129.47 E	Sea area 48km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
3	2023-04-24 21:41:25	2.1	27	37.87 N	129.53 E	Sea area 53km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
4	2023-04-24 21:50:59	2.4	27	37.87 N	129.52 E	Sea area 52km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
5	2023-04-25 05:03:39	2.3	25	37.88 N	129.54 E	Sea area 54km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
6	2023-04-25 12:02:50	3.1	28	37.87 N	129.52 E	Sea area 52km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
7	2023-04-25 15:55:55	3.5	33	37.86 N	129.49 E	Sea area 50km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
8	2023-04-26 06:51:41	2.2	28	37.86 N	129.51 E	Sea area 51km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
9	2023-04-26 12:15:24	2	27	37.87 N	129.52 E	Sea area 52km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
10	2023-04-28 23:39:24	2.6	27	37.88 N	129.51 E	Sea area 53km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
11	2023-05-08 19:51:34	2.5	17	37.49 N	129.13 E	Sea area 4km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
12	2023-05-08 21:12:05	2.1	23	37.87 N	129.51 E	Sea area 52km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
13	2023-05-10 01:53:36	2.5	15	37.49 N	129.14 E	4km southeast of Donghae-si, Gangwon-do
14	2023-05-10 01:53:41	2.6	16	37.49 N	129.12 E	4km south of Donghae-si, Gangwon-do
15	2023-05-10 16:32:10	2.5	16	37.49 N	129.12 E	4km south of Donghae-si, Gangwon-do
16	2023-05-14 08:35:25	3.1	30	37.86 N	129.51 E	Sea area 51km northeast of Donghae-si, Gangwon-do
17	2023-05-15 06:27:37	4.5	31	37.87 N	129.52 E	Sea area 52km northeast of Donghae-si, Gangwon-do

*Five earthquakes in which changes in groundwater level were detected in Gangneung observation wells are shaded.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. 지진 발생 현황

본 연구는 2023년 4월 23일부터 2023년 5월 22일까지, 한 달간 동해안 인근 지역에서 발생한 지진을 분석하였으며, 기상청 자료에 따르면 M2.0 이상 M4.5 이하의 연속지진이 17개로 집계된다(Table 1). 또한 M2.0 미만의 지진은 47회 발생하여 연구기간 동안 총 64회의 지진이 발생하였다. 미소지진 및 소규모 지진의 잦은 발생으로, 동해 지구조 환경과 지진에 따른 2차 피해에 관한 관심이 증대되고 있다.

현재 동해는 동-서 방향의 압축력을 받고 있으며 일본의 서쪽 분지 경계부에는 지진 빈도의 증가 등 섭입대 초기 특성의 나타남이 보고되었다(No et al., 2014). 또한 동해 지진은 연안의 퇴적층 두께보다 깊은 지각에서 발생하여, 서남서 방향으로 진원의 깊이가 깊어진 것으로 보고되었으며, 한반도에서 발생한 지진들의 단층면을 분석한 결과와 함께, 동해 지진의 단층면이 역단층이라는 것을 통해 동북동-서남서의 압축력을 받아 발생한 것으로 추정된다. 이는 지구조 운동으로 인한 응력 축적과 해소의 과정으로 발생했을 것이라고 추정하고 있다. 또한 해저단층과 동해 연속지진의 연계성, 지진해일과 같은 2차적 위험 발생 가능성이 제기되며 향후 정밀한 조사가 필요한 것으로

판단된다(Kim et al., 2023).

3.2. 지진으로 인한 지하수위 변동특성

연구기간 중 발생한 17개의 지진 중, 강릉 관측정(GN-OBS)에 지하수위 변동이 감지된 지진은 5개로 나타났다. 이 5개를 통해 소규모 지진에 대한 지하수위 변동을 분석하였다. 규모는 M2.5~4.5 범위로 나타났으며, 진앙거리는 17.0~40.0 km 범위를 보였다. 지진으로 인한 지하수위 변화를 관측하는 것은 지하수량 및 수질 변화에 미치는 영향을 알아볼 뿐 아니라, 지진해일과 같이 지진에 잇따른 위험 요소를 파악하는 것에 중요한 역할을 한다.

강릉 관측정에 지하수위 변동이 감지된 지진 5개 중, 2023년 5월 15일 오전 6시 27분 37초에 강원 동해시 북동쪽 52 km 해역에서 발생한 M4.5의 지진은 약 54 km 떨어진 동해관측소(TOHA: Tonghae)에 2023년 5월 15일 오전 6시 27분 47초에 지진파가 관측되기 시작하였다(Table 2). 또한 5월 15일 이전에도 여러 차례의 소규모 지진이 발생하였고, M4.5의 지진은 연속지진의 본진으로 보고되었다(Kim et al., 2023).

Fig. 3은 연구 지역에서의 지하수위 변동을 1초 단위로 나타낸 그래프이다. Fig. 3(a)는 연구 기간 중 가장 큰 규모의 지진인 M4.5 지진으로, 지하수위 필터링 분석과 시계열 분석 그래프를

함께 나타내었다. Fig. 3(b)~(e)는 필터링 분석을 통한 그래프를 나타내어, 동해 지진이 발생한 시간을 기준으로 1시간 전후의 지하수위를 살펴보고 비교할 수 있다. 강우와의 연관성은 연구기간 동안 나타난 강수량을 통해 알아보았다. M3.5 지진이 발생한 4월 25일 전후로는 18일 8.3 mm, 29일 0.3 mm의 강수량이 나타나, 약 9 mm도 안 되는 적은 양이었다. 또한 M4.5 지진이 발생한 5월 15일 전후로는 14일 0.1 mm, 18일 0.1 mm와 19일 0.4 mm의 강수량을 보였다. 따라서 지진발생 전후의 이러한 적은 강수량은 순간적인 지하수위 변화에 미치는 영향이 적은 것으로 판단하였다. 또한 시계열 분석과 필터링 분석을 통해 추출된 지하수위 변동 그래프를 보면 비교적 작은 규모의 지진에서는 지하수위 변동 크기가 작지만, 이는 지진파가 통과하여 지하수 관측공 안에서의 떨림을 통해 지하수위 변동이 반영된 것임을 알 수 있다. 지하수위 변동은 지진파와 유사한 진동 형태(oscillatory changes)로 나타났다.

관측된 5개 모두 지진 발생 후 4분 이내에 지하수위 변동이 감지되었으며 변동 지속 시간은 평균 15초로 관측되어, 수위 회복이 단기간에 정상적으로 나타났다는 것을 알 수 있다. 지하수위 변동 폭은 0.5~1.6 cm의 범위를 나타냈고, 관측정과 진앙지와의 거리는 17~49 km 범위였으며, 규모는 M2.5~4.5 범위로 관측되었다(Table 2). 감지된 5개의 지진을 발생 순서대로 살펴보았을 때, 4월 25일에 발생한 M3.5의 지진은 지진 발생 시각에서 2분 21초 후인 15시 58분 16초에 지하수위 변동이 나타났다. 변동 지속 시간은 12초였으며, 최대 변화 폭은 약 0.7 cm로 수위 상승 및 하강이 나타났다. 이후, 5월 8일에 발생한 M2.5 지진은 발생 시각에서 3분 44초인 후인 19시 55분 18초에 지하수위 변동이 나타났다. 최대 약 0.7 cm의 수위 변동이 발생하였으며, 수위 변동은 6초간 지속되었다. 5월 10일에는 M2.5 지진이 두 차례

발생하였다. 각각 지진 발생 시각 5초와 8초 후인 1시 35분 41초와 16시 32분 18초에 지하수위 변동이 관측되었다. 또한 각각 최대 약 0.7 cm와 약 0.5 cm의 수위 변동이 나타났으며 두 변동 모두 20초 이내에 수위가 회복되었다. 감지된 지진 중 최대 규모인 M4.5 지진은 5월 15일에 발생 시각의 11초 후인 6시 27분 48초에 지하수위 변동이 시작되었다. 최대 약 1.6 cm의 수위 하강 및 상승이 발생하였으며, 수위 변동은 28초 동안 지속된 후 회복되었다.

연구 기간 중 지진으로 인한 지하수위 변화가 유의미한 결과임을 확인하기 위하여 지진 발생이 없던 기간을 임의로 지정하여 분석하였다. 2023년 5월 31일 09시부터 12시까지 지하수위 데이터를 본 연구에 활용된 필터링 기법으로 수행하였다. Fig. 4는 지진 발생으로 인한 순간적인 변화를 필터링 기법을 활용하여 관측한 그래프와 지진 발생이 없을 때의 필터링 기법을 적용한 그래프이다. 필터링 기법을 통해서 지진으로 인한 지하수위의 순간적인 변화가 관측된 것을 비교 분석을 통해 확인하였다.

이번에 관측된 지하수위 진동 현상(oscillation)은 지진에 의한 대수층의 일시적인 압축 및 팽창에 따른 결과로 볼 수 있다(Chia et al., 2008; Ok et al., 2010). 즉, 지진파가 전달되는 과정에서 대수층이 압축되면서 공극이 감소하면 지하수위가 상승하고, 반대로 대수층이 다시 팽창되면서 공극이 증가하면 지하수위가 하강하는 현상이 일정 시간동안 반복적으로 나타난 것으로 해석된다(Wakita, 1975; Grecksch et al., 1999; Brodsky et al., 2003; Ok et al., 2010).

3.3. 지진의 규모 및 거리와 지하수위 변동 상관성

같은 관측정 안에서 규모 및 진앙거리에 대한 지하수위 변동 크기의 연관성을 파악하기 위해 지진 규모와 진앙거리 간의

Table 2. Changes in groundwater level due to earthquakes: initial change time, change duration, maximum change in groundwater level

No.	Earthquake	Magnitude (M)	Distance (km)	Initial change time (mm:ss)	Response duration time (sec)	Maximum change in groundwater level (cm)
1	2023-05-15 06:27:37	4.5	49.35	00:11	28	1.6
2	2023-04-25 15:55:55	3.5	46.52	02:21	12	0.7
3	2023-05-08 19:51:34	2.5	17.54	03:44	6	0.7
4	2023-05-10 01:53:36	2.5	17.93	00:05	18	0.7
5	2023-05-10 16:32:10	2.5	17.19	00:08	10	0.5

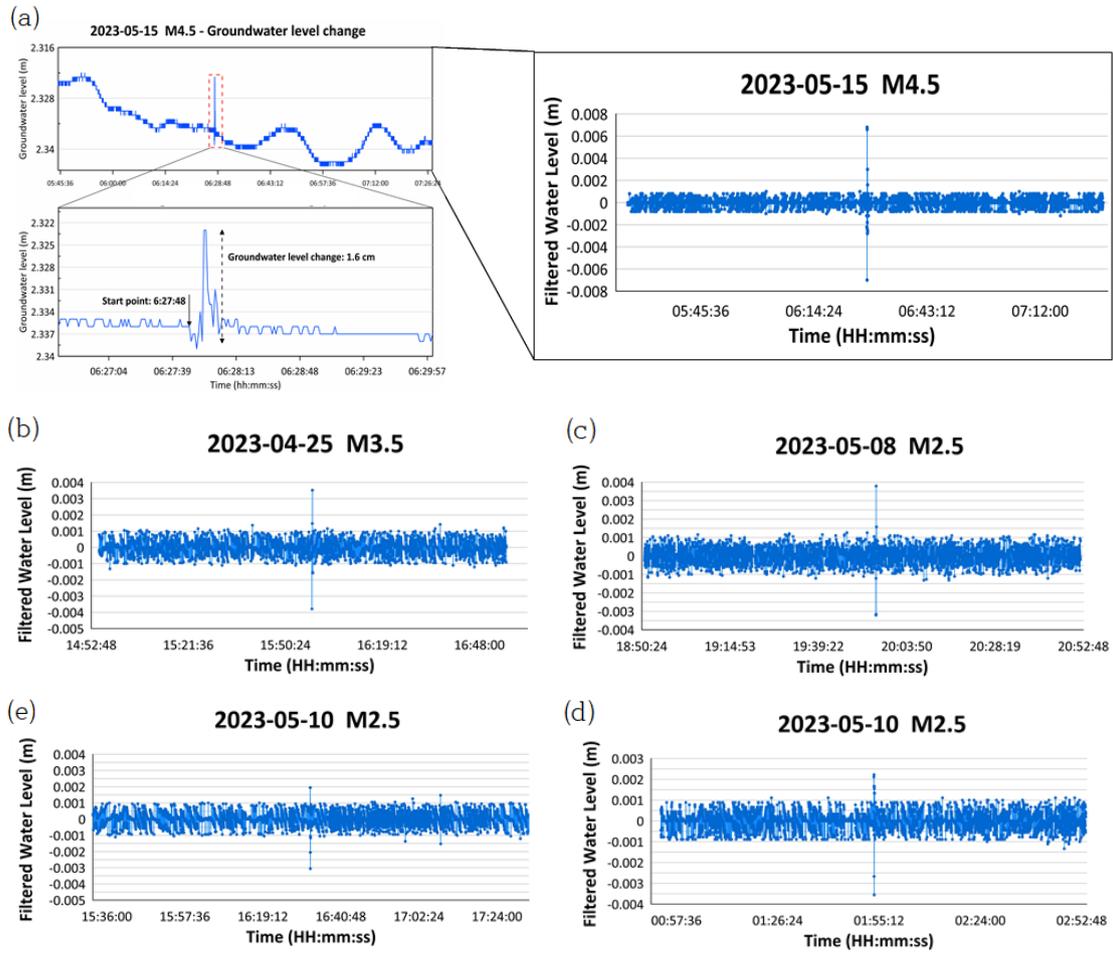


Fig. 3. Changes in groundwater level due to earthquakes, respectively

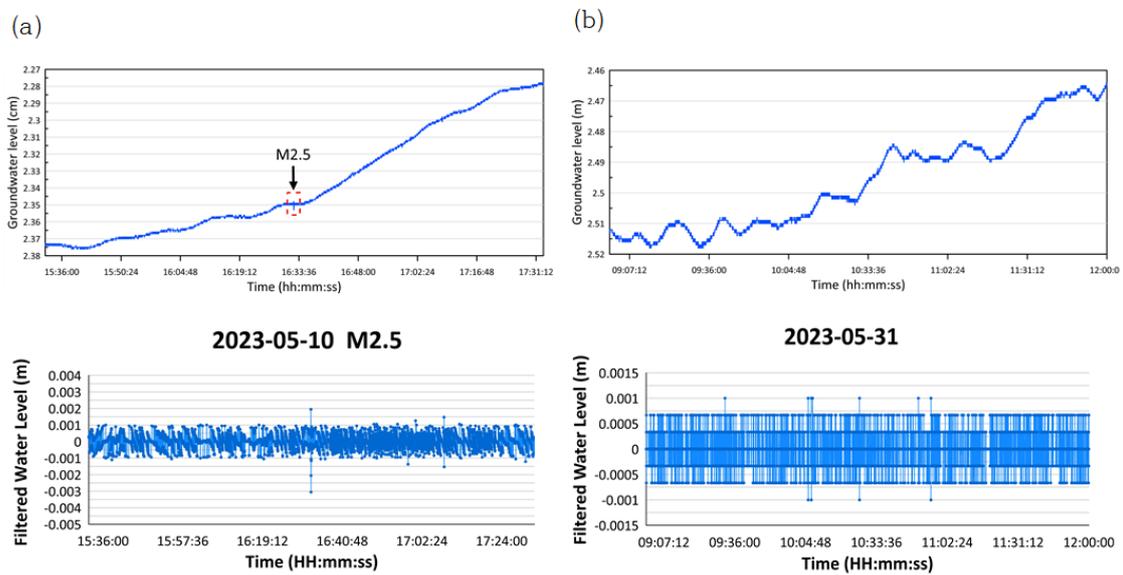


Fig. 4. Comparative analysis of groundwater level changes due to earthquake and natural conditions using filtering techniques

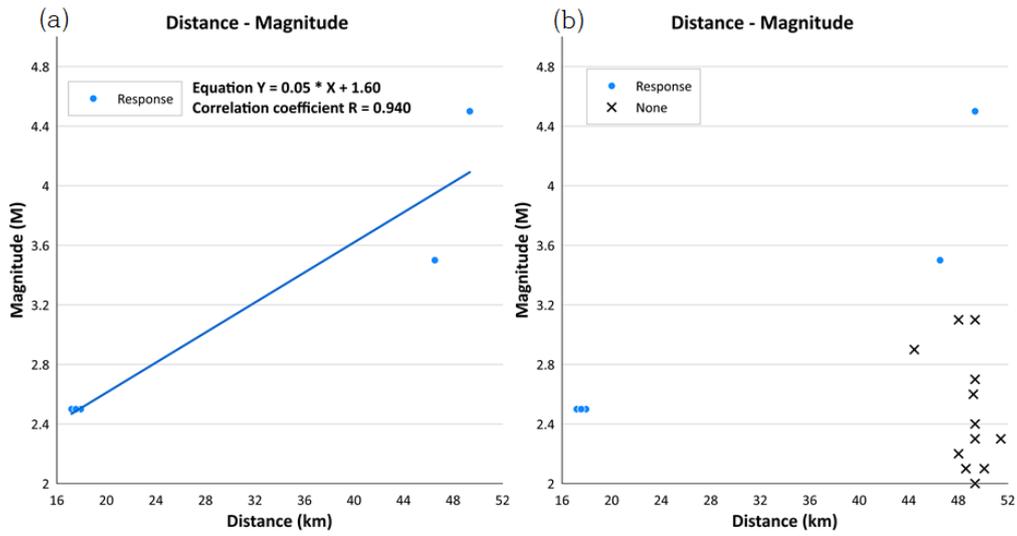


Fig. 5. Correlation between magnitude and distance of earthquakes where changes in groundwater level were detected (a) and earthquakes that were not detected (b)

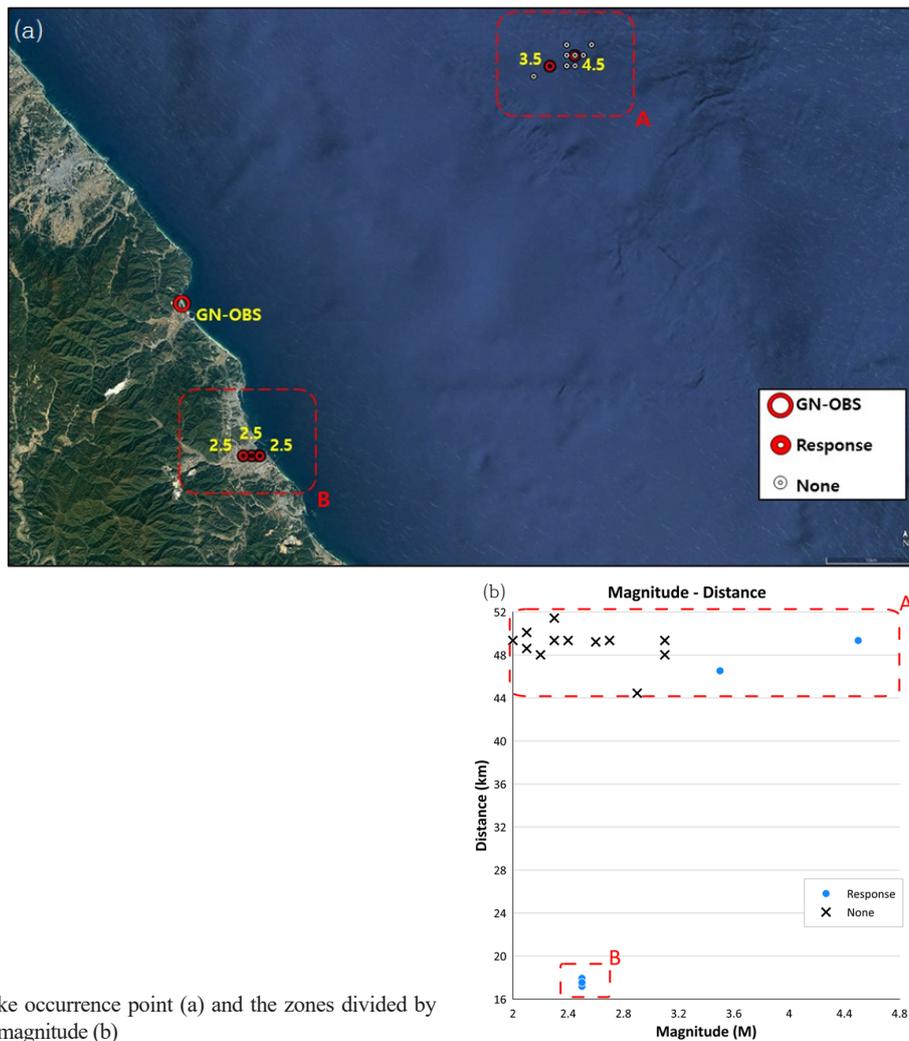


Fig. 6. The earthquake occurrence point (a) and the zones divided by distance according to magnitude (b)

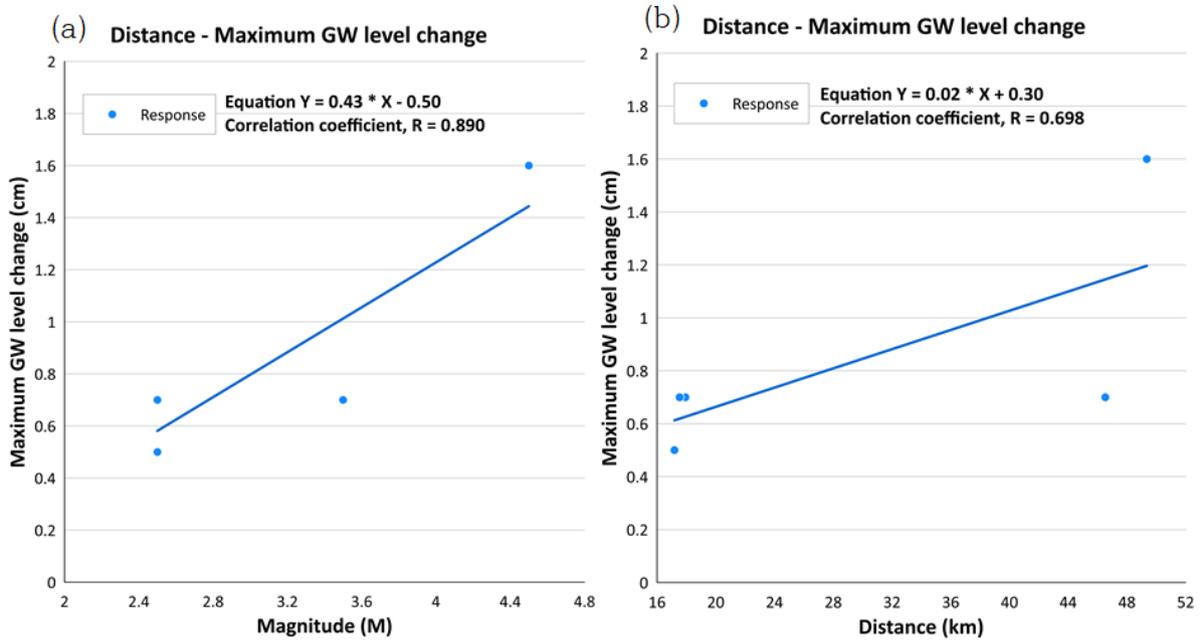


Fig. 7. Correlation between maximum fluctuation in groundwater level and earthquake magnitude (a) and distance (b)

상관관계를 산정하였다. 연구기간 중 총 17번의 지진 중 강릉 관측점에서 지하수위 변화가 감지된 지진 중 가장 큰 규모인 M4.5 지진은 약 49 km의 진앙거리를 가지고 있었으며, M3.5의 지진은 약 46 km의 진앙거리를, M2.5의 지진들은 약 17 km의 진앙거리를 가지고 있었다. 이를 통해 얻은 상관관계 식과 상관계수는 아래와 같다(Fig. 5 (a)).

$$Y=0.05X+1.60, R=0.940$$

규모와 진앙거리의 상관계수는 0.94로 나타나며, 높은 비례 관계임을 확인하였다. 본 연구에서 감지된 지진들은 모두 진앙거리가 500 km 이내이기 때문에 국지 규모(Local Magnitude)를 적용한다.

국지 규모의 식을 살펴보면, 아래 식 2와 같다.

$$M_L = \log A + C_1 \log \Delta + C_0 \tag{식 2}$$

식에서 A는 지진 기록의 최대진폭을 의미하며, Δ는 진앙거리, C₀와 C₁는 규모 결정 계수를 의미한다(KIGAM, 2024). 이를 통해 규모와 진앙거리의 상관관계가 존재하고 있음을 보여준다.

도출된 그래프를 통해 강릉 관측점이 반응하는 소규모 지진의 진앙거리와 규모를 파악할 수 있다. 관측점에서 감지된 5개의 지진 외에 감지되지 않은 12개의 지진은 진앙거리 44 km 이상

52 km 이하로 나타나며, M2.0 이상 M3.1 이하에 분포되어 있다(Fig. 5 (b)). 또한 Fig. 6 (a, b)를 보면, 강릉 관측점으로부터 특정한 진앙거리와 지진 규모에 따라 A와 B 구역으로 나누어 비교할 수 있다. A 구역은 진앙거리 44 km 이상 52 km 이하의 해역에서 발생한 지진으로, M2.1부터 M4.5까지 다양한 진앙거리를 보이며 분포한다. B 구역은 진앙거리 16 km 이상 20 km 이하의 내륙 및 내륙과 밀접해 있는 해안 지역에서 발생한 지진으로, M3.0 이하의 지진이 비교적 단일한 진앙거리를 보이며 분포한다. 하지만 그 중, A 구역에서 지하수위 변동이 감지된 지진은 M3.5와 M4.5이다. 이는 규모가 작은 지진은 진앙지와의 거리가 짧을 때 강릉 관측점이 변동을 감지할 수 있는 것으로 보인다. 따라서 강릉 관측점은 진앙거리 약 17 km 이내에서 나타나는 M2.5 이상의 지진과 진앙거리 약 46 km 이내에서 나타나는 M3.5 이상의 지진에 영향을 받아 지하수위 변동이 발생한 것으로 판단된다.

지진 규모와 진앙거리에 따른 지하수 변동 크기 역시 비례 관계가 보임을 확인하였다. 각각의 상관관계 식과 상관계수는 아래와 같다(Fig. 7).

$$Y=0.43X-0.50, R=0.890$$

(지하수위 최대 변동 폭과 지진의 규모)

$$Y=0.02X+0.30, R=0.698$$

(지하수위 최대 변동 폭과 진앙지와의 거리)

지진 규모에 따른 지하수 변동 크기 간의 상관계수는 0.89, 진앙거리에 따른 지하수 변동 크기 간의 상관계수는 0.698로 분석되었으며, 상관계수의 값을 통해 근거리 지진에서는 규모의 영향을 더 많이 받는 것으로 보인다. 이는 관측정에서 지진파에 의해 받는 에너지가 커질수록 지하수위 변동 크기도 커진다는 것을 의미한다(Lee et al., 2011). 또한 감지된 지진에서 규모와 진앙거리 간의 상관관계를 확인하였기 때문에 진앙거리에 따른 지하수위 변동 반응 또한 선형적으로 나타나는 것으로 판단된다. 지진파가 통과하면서 관측정 주변에 압축과 팽창이 발생하여 대수층에 영향을 준 것을 확인할 수 있다.

감지된 5개의 지진에서 거리에 따른 시간 지연과 규모에 따른 지속 반응 시간 등은 선형적인 상관관계를 보이지 않았다. 연구 기간에 발생한 모든 지진을 분석한 것이 아닌, 감지된 지진으로 분석한 것이기에 모든 요소의 상호관계를 파악하기에는 어려움이 있다.

다만, 지하수는 암반 내에 존재하는 공극이나 균열을 통해 이동하기 때문에 대수층이 압력을 받으면 물리화학적 영향을 받을 수 있다(Woo et al., 2015). 특히, 본 연구에서 규모와 진앙거리에 따른 지하수위 변화가 선형적 비례 관계를 보인다는 점에서, 인근 지역에서 연이어 발생한 지진과 지진파의 중첩된 영향으로 인해 대수층에 변형이 나타나고, 공극의 연결성이나 공극압 분포가 변해 지하수 유동 경로나 수질 등의 변화를 초래할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 2023년에 국내에서 발생한 가장 큰 규모인 M4.5 지진을 기준으로, 2023년 4월 23일부터 2023년 5월 22일까지 발생한 동해안 인근 지역 지진 중 강릉 관측정을 통해 분석한 지하수위 반응은 아래와 같이 요약할 수 있다.

- (1) 동해안 인근 지역에서 발생한 17개의 지진 중 5개 지진에 의한 지하수위 변동이 강릉 관측정(GN-OBS)에서 관측되었다. 지하수위 변동이 관측된 5개의 지진에서는 지하수위 변동이 진동 형태로 나타났으며, 그 폭은 0.5~1.6 cm 범위를 나타내었다. 또한 지하수위 변동이 감지되지 않은 지진과의 비교를 통해 강릉 관측정에 영향을 미치는 소규모 지진의 진앙거리 및 규모를 파악하였다. 진앙거리 약 17 km 이내의 M2.5 이상의 지진과 진앙거리 약 46 km 이내의 M3.5 이상의 지진으로 인해 지하수위 변동이 발생했을 것이라고 판단된다.
- (2) 연구결과에 따르면, 지진 규모와 지하수위 변동 크기,

진앙거리와 지하수위 변동 크기의 상관관계를 통해 식과 상관계수를 산정한 결과, 각각 0.89와 0.698의 높은 상관성을 보였으며, 이는 선형적인 상관관계 및 비례 관계를 보인다는 것을 확인하였다. 일반적으로 지진이 발생하게 되면 에너지가 방출되며 지진의 규모에 따라서 에너지가 증가함에 따라 본 연구에서와 마찬가지로 지진의 규모와 지하수위 최대 변동폭은 비례하는 것으로 보이며 향후, 지속적인 모니터링을 통해 데이터가 누적됨에 따라 보다 명확한 연구 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 소규모 지진에 의한 지하수위 변동을 1초 단위로 정밀하게 파악하여, 소규모 지진과 지하수위의 상관성에 관한 연구의 필요성을 보여줬다는 것에 의미가 있다. 지진에 의한 지하수위 변동은 수량 및 수질적인 측면에서도 영향을 줄 수 있기 때문에, 추후 지속적인 모니터링을 기반으로 지진에 의한 지하수계의 영향과 다양한 수리지질 요소들의 상호관계에 대한 분석을 통해 지진으로 인한 수문지질학적인 2차 피해에 대한 보완과 대비에 도움이 될 것으로 기대한다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 지하수환경연구센터의 기본사업 “기후변화대응 대응량 지하수 확보 및 최적 활용기술 개발(24-3411)”의 일환으로 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Barbieri, M., Boschetti, T., Petitta, M. and Tallini, M., 2005, Stable isotope (^2H , ^{18}O and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy), *Applied Geochemistry*, 20(11), 2063-2081.
- 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.
- Charmoille, A., Fabbri, O., Mudry, J., Guglielmi, Y. and Bertrand, C., 2005, Post seismic permeability change in a shallow fractured aquifer following a ML 5.1 earthquake (Fourbanne karst aquifer, Jura outermost thrust unit, eastern France), *Geophysical Research Letters*, 32(18).
- Cheong, J.Y., 2013, Analyzing groundwater change on a volca-

- nic island caused by the impact of the M9 Sumatra earthquake, *Geosciences Journal*, 17(2), 183-195.
- 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 and Applied Geophysics*, 165, 5-16.
- 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, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 1062-1068.
- Claesson, L., Skelton, A., Graham, C., Dietl, C., Mörth, M., Torsander, P. and Kockum, I., 2004, Hydrogeochemical changes before and after a major earthquake, *Geology*, 32(8), 641-644.
- Claesson, L., Skelton, A., Graham, C. and Mörth, C. M., 2007, The timescale and mechanisms of fault sealing and water-rock interaction after an earthquake, *Geofluids*, 7(4), 427-440.
- Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, I.S. and Bennett, R.R., 1965, The response of Well-Aquifer Systems to Seismic Waves, *Journal of Geophysical Research*, 70(16), 3915-3926.
- Ferris, J. G., 1951, Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility, *International Association of Hydrological Sciences*, 33, 148-155
- Grecksch, G., Roth, F. and Kumpfle, 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.
- Hong, T.K., Lee, J. and Hwang, S.E., 2015, Long-term evolution of intraplate seismicity in stress shadows after a mega thrust, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 245, 59-70.
- 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), *Geology*, 47(6), 695-706.
- Jónsson, S., Segall, P., Pedersen, R. and Björnsson, G., 2003 Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients, *Nature*, 424, 179-183.
- Jónsson, S., Segall, P., Pedersen, R. and Björnsson, G., 2003, Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients, *Nature*, 424(6945), 179-183.
- Kano, Y. and Yanagidani, T., 2006, Broadband hydroseismograms observed by closed borehole wells in the Kamioka mine, central Japan: Response of pore pressure to seismic waves from 0.05 to 2 Hz, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B3).
- Kee, W.-S., Kim, S.W. Kim, H., Hong, P., Kwon, C.W., Lee, H.-J., Cho, D.-L., Koh, H.J., Song, K.-Y., Byun, U.H., Jang, Y. and Lee, B.C., Geologic Map of Korea (1:1,000,000), 2019, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kihm, Y.H. and Hwang, J.H., 2011, Geological Report of the Gangeung-Jumunjin Sheets, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, B., Kim, Y.M., Son, M., Song S.K., Oh T.S., Lee, G.-S., Lim, H., Cho, C.S., Choi Y. and Choi J.-H., 2023, Donghae(Gangwon) Consecutive Earthquake Report, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
- 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: Solid Earth*, 104(B6), 13073-13082.
- 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, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B8), 19121-19134.
- KIGAM(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), Magnitude, <https://www.kigam.re.kr/quake/> [accessed 2024.04.04]
- KMA(Korea Meteorological Administration), 2024a, Earthquake Trends, <https://www.kma.go.kr/neng/index.do> [accessed 24.04.01]
- KMA(Korea Meteorological Administration), 2024b, Gangneung Meteorological annals, <http://www.kma.go.kr/> [accessed 24.04.01]
- KMA(Korea Meteorological Administration), 2024c, 2023 Earthquake Search(Korea), <http://www.kma.go.kr/> [accessed 24.04.01]
- Lay, T. and Wallace, T. C., 1995, Modern global seismology, *Elsevier*.
- Lee, C.W. 2007, Analysis of Monitoring Data Obtained from Three Boreholes in Haengbok(Sejing) City for Geothermal Resources Development, *The Korean Society for New and Renewable Energy*, 445-448
- Lee, S.-H., Hamm, S.-Y., Ha, K., Kim, Y., Cheong, B.-K., Ko, K.-S., Koh, G.W., Kim. and G.-P., 2011, Analysis of Groundwater Level Changes Due to Earthquake in Jeju Island (For the Indonesian Earthquake with Magnitude 7.7 in 2010), *The Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 16(2), 41-51.
- Lee, S.-H., Ha, K., Hamm, S.-Y. and Ko, K.-S., 2013a, Groundwater responses to the 2011 Tohoku Earthquake on Jeju Island, Korea, *Hydrological Processes*, 27, 1147-1157.
- Lee, S.-H., Ha, K., Shin, J.S., Ko, K.-S. and Hamm, S.-Y., 2013b Successive Groundwater Level Changes on Jeju Island due to the MW9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Bulletin*

of the Seismological Society of America, 103(2B), 1614-1621.

Lee, S.-H., Cheong, J.-Y., Park, Y.-S., Ha, K., Kim, Y., Kim, S.-W. and Hamm, S.-Y., 2017, Groundwater level changes on Jeju Island associated with the Kumamoto and Gyeongju earthquakes, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1783-1791.

Lee, H.A. and Woo, N.C., 2012, Influence of the M9.0 Tohoku Earthquake on groundwater in Korea, *Geosciences Journal*, 16(1), 1-6.

Liu, P. L. F., Turcotte, B. R. and Kulhawy, F. H., 1986, Wave propagation over a sediment trench, *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 112(1), 64-77.

No, T., Sato, T., Kodaira, S., Ishiyama, T., Sato, H., Takahashi, N. and Kaneda, Y., 2014, The Source Fault of the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake Revealed by Seismic Imaging, *Earth and Planetary Science Letters*, 400(15), 14-25.

Ok, S.I., 2010, Characteristics of Aquifer System and Change of Groundwater Level due to Earthquake in the Western Half of Jeju Island, *Economic and Environmental Geology*, 43(4), 359-369.

Park, Y., Lee, J.Y., Lim, H.G. and Park, Y.C., 2011, Characteristics of hydraulic conductivity of carbonate aquifers in Gangwon Province, *The Journal of Engineering Geology*, 21(1), 79-85.

Quilty, E. and Roeloffs, E., 1997, Water-level changes in response to the 20 December 1994 earthquake near Parkfield, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(2), 310-317.

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(3), 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.

Roeloffs, E., Sneed, M., Galloway, D.L., Sorey, M.L., Farrar, C.D., Howle, J.F. and Hughes, J., 2003, Waterlevel changes in-

duced by local and distant earthquakes at Long Valley caldera, California, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 127, 269-303.

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.

Shi, G., Shi, Y. and Wang, Y., 2007, Behaviour of end-plate moment connections under earthquake loading, *Engineering structures*, 29(5), 703-716.

Skelton, A., Andr en, M., Kristmannsd ttir, H., Stockmann, G., M rth, C. M., Sveinbj rnsd ttir,  . and Kockum, I., 2014, Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland, *Nature Geoscience*, 7(10), 752-756.

USGS(United States Geological Survey), Earthquake Hazards Program, <https://www.usgs.gov/> [accessed 24.06.28]

Wakita, H., 1975, Water wells as possible indicators of tectonic strain, *Science*, 189, 553-555.

Wang, C. Y. and Chia, Y., 2008, Mechanism of water level changes during earthquakes: Near field versus intermediate field, *Geophysical Research Letters*, 35(12).

Wang, C. Y. and Manga, M., 2009, Groundwater level change, *Earthquakes and water*, 67-95.

Wang, K., Hu, Y., and He, J., 2012, Deformation cycles of subduction earthquakes in a viscoelastic Earth, *Nature*, 484(7394), 327-332.

Woo, N.C., Piap, 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.

Yun, S.M., Hamm, S.-Y., Cheng, J.Y., Lee, C.M., Seo, W.S. and Woo, N.C., 2019, Analyzing groundwater level anomalies in a fault zone in Korea caused by local and offshore earthquakes, *Geosciences Journal*, 23, 137-148.