18CTAP-C129727-02

보안 과제( ), 일반 과제(√) / 공개(√), 비공개( )발간등록번호( )

R&D / 18CTAP-C129727-02

지하수내 라돈 실시간 측정 및 지하수위의 연속 자동측정 방식을 활용한 지진계측시스템 구축 연구 최종보고서

2019.01.

주관연구기관 / 대전대학교 산학협력단
공동연구기관 / (주)지앤테크

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

지하수내 라돈 실시간 측정 및 지하수위의 연속 자동 측정 방식을 활용한 지진계측시스템 구축 연구 최종보고서

2019

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'지하수내 라돈 실시간 측정 및 지하수위의 연속 자동 측정 방식을 활용한 지진계측시스템 구축 연구'(연구개발 기간 : 2017. 04. ~ 2018. 12.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2019. 01. 18.

주관연구기관명 : 대전대학교 산학협력단 (대표자) 황 석 연 (인)
공동연구기관명 : ㈜지앤테크 (대표자) 김 형 종 (인)

주관연구기관책임자: 김 규 범
공동연구기관책임자: 김 형 종

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>1615009285</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2017.04.01
~ 2018.12.31</td><td>단계구분</td><td>2 / 2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">기초원천</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">지하수내 라돈 실시간 측정 및 지하수위의 연속 자동 측정 방식을 활용한 지진계측시스템 구축 연구</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">김 규 범</td><td>해당단계
참여연구원 수</td><td>총: 9 명
내부: 9 명
외부: 명</td><td>해당단계
연구비</td><td>정부: 150,000 천원
민간: 50,000 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 200,000 천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여연구원 수</td><td>총: 9 명
내부: 9 명
외부: 명</td><td>총 연구비</td><td>정부: 300,000 천원
민간: 100,000 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 400,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">대전대학교 산학협력단</td><td colspan="2">참여기업명</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>공동연구</td><td colspan="3">연구기관명: ㈜지앤테크</td><td colspan="2">연구책임자: 김 형 종</td></tr>
</table>

※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	해당사항 없음

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록・기탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

구입기관	연구시설・장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

본 연구에서는 지진시 나타나는 지하수위, 수질 및 라돈222 변동 특성에 관한 비교 연구를 통하여 지진시 지하수위 및 라돈222의 연속 자동 측정 방식을 활용한 지진계측 시스템 구축 방안을 제시하였음. 2016년 경주 및 2017년 포항 지진 발생시 Artificial neural network 및 자동지하수위계를 이용하여 지진시 지하수위의 변동 및 지하수 수질 변화를 평가하고 지하수 내 라돈 연속 자동측정장치 운영으로 데이터 수집 및 지진에 따른 지하수 내 라돈 방출 특성 분석과 라돈 방출의 시공간적 상관성 분석을 통하여 라돈을 활용한 지진 계측 효용성을 판단하여 연구 결과로 지하수위, 라돈 농도 변동 계측을 통한 지진발생지역 및 예상지역의 지진계측지침을 제작하였음

보고서 면수

138

연구의 목적 및 내용	□ 본 연구는 지진시 나타나는 지하수위, 수질 및 라돈222 변동 특성에 관한 비교 연구를 통하여 지진시 지하수위 및 라돈222의 연속 자동측정 방식을 활용한 지진계측 시스템 구축 방안을 마련하고자 함 - 지진 발생 지역 지하수 수질 및 동위원소 분석을 통한 지하수 특성 파악 - 지진 발생 지역 및 그 인근 국가지하수관측망의 지하수위 데이터 활용하여 지진 발생시 지하수위 변동 특성 분석 - 라돈 자동 측정 장치 설치 운영하여 지진 발생시 라돈 방출 변동 특성 분석 및 효용성 평가 - 분석 및 평가된 지하수위 및 라돈 방출 특성을 활용한 지진계측 시스템 구축 방안 제시
연구개발성과	□ 지하수 활용 지진관측 시스템 구축 방안 수립(지침)
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	□ 본 연구의 지진 발생 및 예상 지역의 지하수위 및 라돈 방출 특성을 활용한 지진 계측 시스템 구축을 통한 지진 예측 연구의 확대 가능성, 본 연구에서 사용되는 라돈 연속자동측정 장치와 같은 지하수내 라돈 연속측정 장치의 기술 경쟁 촉진에 기여하며, 지하수 활용 관측시스템의 시범 설치 운영을 통한 지진관측체계의 활용 가능성 진단으로 향후 지진관측체계의 확장에 기여 □ 본 연구를 통한 지진계측 기법 및 관측체계를 활용하여 국내뿐만 아닌 국외 지진 발생 지역까지 확대하여 지진 관측시스템 설치 및 운영함으로써 향후 계측 산업 분야의 이익 창출 기대 □ 본 연구를 통해 구축된 지진 관측 시스템을 활용하여 지진에 신속히 대응할 수 있는 의사결정 기술 확보하고 정부의 지진관측체계에 지하수 활용한 시스템을 구축할 수 있는 지침 제공함으로써 향후 지진관측체계 구축에 활용함으로써 지진발생시 보다 빠르게 각 관측소 및 기상청과 연계하여 국민에게 통보하게 되며, 이를 통해 국민 불안감 해소와 긴급 대응 지원 system을 통한 피해 예측 및 최소화 방안에 기여

핵심어 (5개 이내)	지진	지하수	라돈	계측	안전

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	☐ In this study, the basic plan for groundwater-based earthquake monitoring system will be proposed by using the relationship study between groundwater level, quality and radon content and earthquake activity - Characterization of groundwater quality and isotope in the earthquake region - Analysis of groundwater level's change of groundwater monitoring well installed at the earthquake region - Installation of automatic observation system for groundwater radon content and radon radiation analysis - Proposal for the basic plan for groundwater-based earthquake monitoring system
Results	☐ Manual and report of groundwater-based earthquake monitoring system
Expected Contribution	☐ Application of groundwater radon monitoring technology to the earthquake research and prediction ☐ Activation of earthquake research by using the automatic radon monitoring technology ☐ Advance to the foreign market of earthquake monitoring system ☐ Secure the safe country from earthquake failure and destruction

Keywords	Earthquake	Groundwater	Radon	Monitoring	Safety

〈CONTENTS 〉

1. Summary of R&D Project ····· 1

2. Status of Domestic and International Technology Development ····· 4

3. Contents of Research Performance and Achievement ····· 12

4. Indicator of purpose and contribution to related fields ····· 114

5. Plan to Utilize R&D Result ····· 116

6. International Science and Technology Information ····· 118

7. Security Degree of R&D Achievement ····· 126

8. Research Facilities and Equipment Registersd in the National Science and Technology Comprehensive Information System ····· 127

9. Implementation Performance of Safety Measures in Performing R&D Project ····· 128

10. Representative Research Results of R&D Project ····· 129

11. Others ····· 130

12. Reference ····· 131

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 4

3. 연구수행내용 및 성과 ····· 12

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 114

5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 116

6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 118

7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 126

8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 127

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 128

10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 129

11. 기타 사항 ····· 130

12. 참고 문헌 ····· 131

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 연구 목표

○ 본 연구는 지진시 나타나는 지하수위, 수질 및 라돈222의 변화 특성에 대한 비교를 연구를 통하여 지하수위 변동 및 지하수내 라돈의 연속 자동측정방식을 활용한 지진 관측 시스템의 구축 방안을 마련하는데 목표가 있다.

- 지진 예측 및 평가를 위한 지하수위 변동 자료의 활용성 평가
  - ANN, 시계열 등 고급 통계 분석을 활용한 국내 지하수 관측망의 지하수위 자료의 지진 상관성 분석 및 예측 가능성 진단
- 지하수내 라돈 연속 자동측정 장치를 활용한 지진 계측 방안 분석
- 지진 발생구역 파쇄대의 지하수 수질 및 동위원소 방출 특성 분석
- 지하수 활용 지진 관측 시스템의 설계 방안(지침) 수립

나. 연구개발 개요

○ 연구기간 : 21개월 (1차년도 : 9개월, 2차년도 : 12개월)

○ 총 연구비 : 4억원(정부 3억원, 민간 1억원)

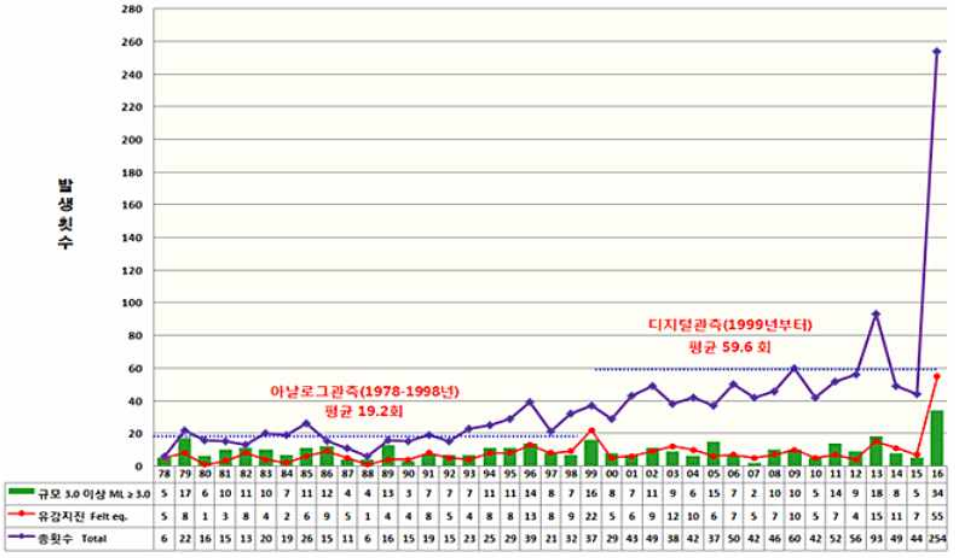
2. 연구개발의 필요성

○ 2016년 9월 12일 경상북도 경주시에서 발생한 규모 5.8의 지진은 1978년 기상청이 계기지진 관측을 시작한 이후에 한반도에서 발생한 역대 최대 규모의 지진으로서, 2017년 1월 21일까지 570회가 넘는 여진이 발생하였다. 이와 같이, 경주 지진을 통하여 우리나라가 지진 안전지대라는 인식에 변화가 생기고 있으며, 이와 관련하여 지진의 계측 방안 및 지진 관측 시스템 설계에 대한 연구가 필요한 시점이다.

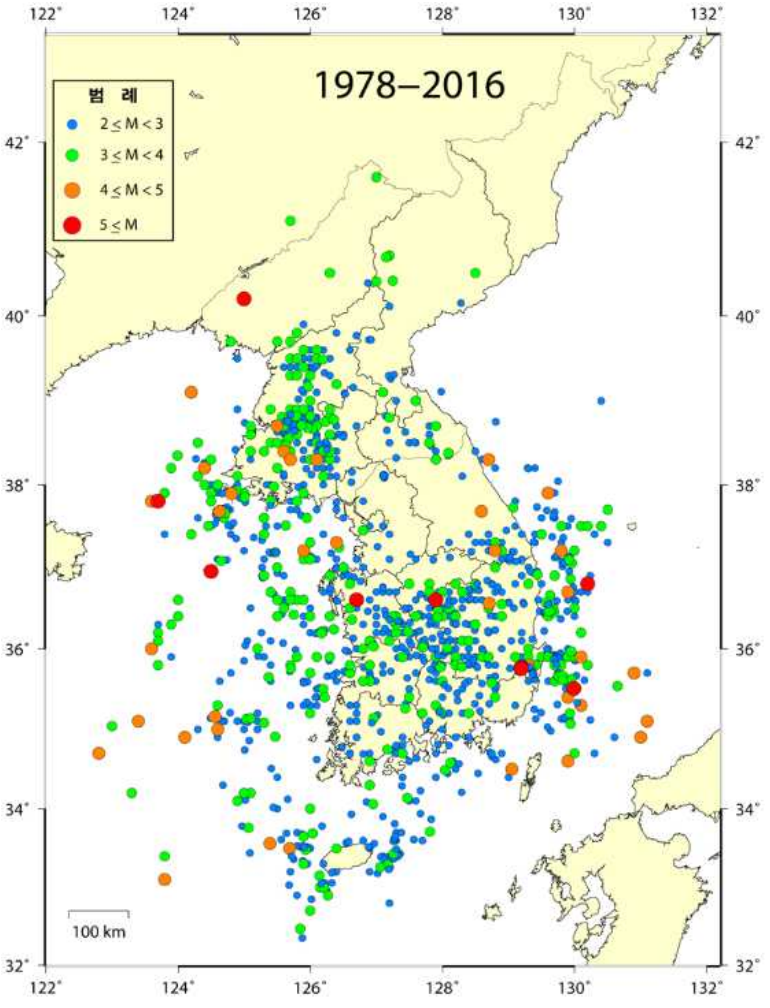
○ 지진 발생 구역인 경주인근 지역은 활성단층인 양산단층 주변지역이며, 경주 지진 발생 후 기상청과 서울대, 부산대, 부경대의 지질학과 교수들로 구성된 여진분석 TF팀의 조사에 의하면 경주 지진의 진원이 양산단층이라는 결론을 내렸으며, 경주인근 지역의 파쇄대 특성에 따른 지하수 수질 및 동위원소 방출, 라돈 방출 특성에 대해 연구할 필요성이 있다.

○ 지진과 관련하여 지하수위 변동, 라돈 방출 특성 및 지진 계측에 관한 연구는 국외에서 일부 실시되었으며, 국내 연구는 미흡한 실정이다. 국외 연구 중 지진 발생시 지하수위 및 라돈222 방출 변동에 관한 연구가 다수 존재하며, 국내에서 지진 발생시 지하수위 및 라돈222 방출에 관한 연구가 필요하며 이를 활용한 최적의 지진 계측 방안이 필요하다.

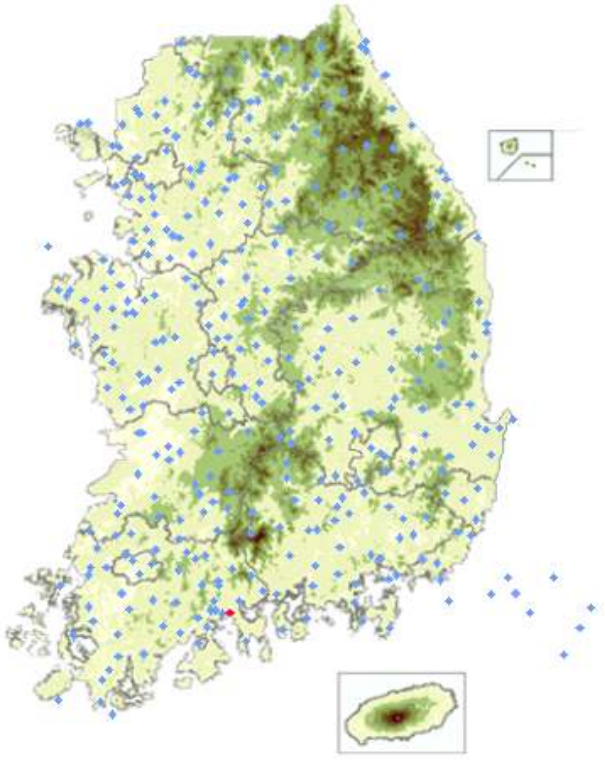
○ 기상청이 발표한 국내지진 발생 추이는 1978년부터 2015년까지 연 평균 지진 약 32회 발생했지만, 2016년 급증하여 254회로 나타났다(그림 1.2.1). 2016년 9월 12일 경주 지진의 여진은 2017년 1월 21일까지 총 570회가 발생했으며, 지진 규모 1.5~3.0 미만은 549회, 3.0~4.0 미만은 20회, 4.0~5.0 미만은 1회가 발생했다(그림 1.2.2).



[그림 1.2.1] 국내지진 발생추이



[그림 1.2.2] 진앙분포도 및 규모(출처 : 기상청)



[그림 1.2.3] 국가지하수관측망 현황(출처 : 국가지하수정보센터)

○ 본 연구는 그 동안 언론 등을 통하여 문제시 되었던 지하수위 및 라돈 방출 특성을 활용한 지진 계측에 대한 연구를 수행함으로써 향후 지진에 신속히 대응하기 위한 의사결정 기술을 확보하는데 기여하고 이를 통해 지진 관측 시스템 설계 방안을 수립한다. 최근 지진발생이 증가하고 작년 지진 사례에서 보았듯이 지하수위는 지진과 거의 동시에 변화가 나타나는 것으로 확인된 만큼 체계적인 연구가 필요하며, 국외에서는 라돈을 활용한 지진 연구가 다수 수행되었으나 국내의 경우 지하수내 라돈 자동 관측 기술의 부족 및 관심저하로 연구가 미비하였으나 관측기기 확보 등 연구 기반이 마련되어 있어 지진에 대한 라돈 연구 방법론이 개발되고 그 중요도가 한층 높아졌다.

3. 연구개발 범위

○ 국내 지진 예측 연구는 지질에 따른 지진예측, 지진의 영향에 의한 구조물 피해 영향 평가 등에 국한되어왔다. 본 연구에서는 국내 거의 진행된 바 없던 지하수위 및 라돈 방출량 변화와 지진과의 상관성에 관한 연구를 진행한다.

○ 지진 전조 증상으로써 라돈 방출 계측에 선행연구로 개발된 자동 라돈 연속 자동측정기를 활용하여 지진 발생예상 지역 및 지진 발생 지역에 장기적인 라돈 방출 계측을 실시한다. 또한 연구의 신뢰성 검증을 위해 지진 다발 지역인 일본의 관측소에 라돈 연속 자동측정기를 설치하여 무선으로 데이터를 국내에 수신한다. 진행된 연구를 바탕으로 지진 관측 시스템의 최적 설계 방안을 수립한다.

○ 본 연구에서는 지진이 관통하는 단층대 직상부에 전기비저항 탐사 등의 현장 탐사 및 조사를 실시하고 신규 관측공을 굴착 및 설치하여 지하수위 변동과 라돈 계측을 실시한다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 연구의 이론적 배경

지하수위와 지진 발생간의 상관관계 연구는 1970년대 후반부터 일본을 중심으로 수행되어 왔다. 다수의 일본 연구자들은 지하수의 이상적 변화와 대형 지진의 관계를 연구하였으며, 1980년대 이후 일본지질조사소(1976, 1985)에서 보다 체계적인 계측 기반의 연구를 수행하였다. 지하수 온도 변화와 지진의 관계에 대한 연구 및 온천 지역에서의 지진에 의한 지하수위 변화 특성을 연구한 바 있다.

다공성 매질의 강도와 같은 물리적 특성은 공극 유체압에 의하여 결정이 되며, 다음 유용응력(σ_{ij}^{eff})으로 정의된다.

$$\sigma_{ij}^{eff} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij}$$

여기에서, p는 공극압, α는 Biot-Willis 계수, δ_{ij}는 Kronecker delta를 의미한다. 유효수직응력이 0이 되면 마찰이 없이 단층이 발생되고 퇴적물은 물리적 강도를 손실하게 된다. 투수성의 이방적 특성의 일반적인 기원은 퇴적물의 퇴적 작용과 투수성이 다른 퇴적암의 분포에 의하여 결정된다. 따라서, 층리를 갖는 지층에서의 층리와 평행한 총투수계수는 아래 평균으로 나타낼 수 있다.

$$k_H = \sum_i k_i \left(\frac{b_i}{b_t} \right)$$

여기에서, b_i와 k_i는 i번째 층의 두께와 투수계수이며, b_t는 전체 지층의 총 두께에 해당한다. 반면에, 층리에 수직 방향으로의 총투수계수는 아래 평균에 의하여 나타낼 수 있다.

$$k_V = \left(\frac{b_t}{\sum_i (b_i / k_i)} \right)$$

수리전도도 K는 전이되는 유체의 특성과 공극성 매질 특성의 조합에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{\rho_f g k}{\mu}$$

여기에서, ρ_f와 μ는 유체의 밀도와 점성을 의미하며, k는 공극성 매질의 투수계수, g는 중력가속도이다.

고체 매질을 따라 전파되는 파장은 Rayleigh wave와 Love wave로 구분되는데, Rayleigh wave는 파의 이동 방향에 따른 종파 및 횡파 이동을 모두 포함하나, Love wave는 횡파만이 나타난다.

1989년에 발생된 대만의 Ch-Chi 지진(M7.6) 발생시 지하수의 수두 h는 지진 발생 이후의 시간에 따라 다음 식으로 표현이 가능하였다.

$$\ln h = a - bt$$

여기에서, b는 다음과 같으며 대수층의 형태적 특성과 물리적 특성에 의하여 결정된다.

$$b \approx \pi^2 \frac{K}{4L^2}$$

K는 수리확산계수이며, L은 대수층의 길이(characteristic length)에 해당한다.

유사하게, 지중내의 대수층에서의 변화는 지표 유출량의 변화를 발생시키는데 기저유출 곡선 분리에 의한 유량과 지진 발생 이후 시간의 관계는 다음과 같이 나타내기도 하였다.

$$\ln Q = d - ct$$

여기에서 c는 감쇄상수에 해당되는데, 다음과 같이 대수층의 특성과 관련성이 있다.

$$c \approx \pi^2 \frac{K}{4L^2}$$

이와 같은 여분으로 발생, 유출되는 물의 기원은 몇 가지로 설명이 가능하다. 물은 지진과 동시에 발생되는 탄성 변형 작용에 의하여 지각으로부터 방출되거나, 증가된 균열대의 투수계수에 의하여 상부 지각에서 방출되거나, 지진 동시적 액상화나 고화 작용에 의하여 물이 배출되는 것 등으로 설명이 되고 있다.

지진 발생시 지진파는 2가지(Oscillation 및 Permanent Offset) 형태로 지하수위에 영향을 미치게 된다. Oscillation 형태의 경우에는, 파동의 이동에 비하여 관측 주기가 충분한 경우에 측정될 수 있다. Chart 기록지의 경우에 짧은 Oscillation 효과가 수직선으로 도시되어 나타나기도 하나, 수 분 간격으로 디지털로 측정되는 경우에는 에러 자료처럼 나타나기도 한다. 일반적인 주기성은 약 20초 정도로 관찰되는데 이는 지하수위 변화가 장주기의 표면파에 의하여 나타나는 현상과 일맥상통한다. Oscillation 이론은 지진파가 우물내의 대수층을 팽창 및 수축시키는 작용을 한다는 것을 기본으로 한다. 대수층이 충분히 큰 투수량계수를 갖고 있다면, 이 지진파의 압력은 우물의 내부 및 외부로 지하수의 유동을 발생시키며, 이 유동은 물 기둥의 공진 운동을 야기한다. 대부분의 대수층-우물 시스템에서 이론적인 빈도는 우물내 물기둥의 높이에 따라서 약 10~30초 정도로 나타난다. 한편, 실제 현장에서 측정된 연구결과에 의하면(USGS), 지진에 의한 대수층 내 공극압의 변화와 지하수위 변동은 유사한 크기로 나타남을 알 수 있는데, 이는 과거의 생각했던 지진파에 의한 공극압의 변화보다 훨씬 큰 변화가 나타나고 이로 인한 지하수위 변동이 발생될 수 있음을 추정할 수 있다.

두 번째 형태인 Offset(급변, Step)도 기존의 1964년 알래스카 지진 연구에 의하여 제시된 바 있는데, 단층 상쇄 작용은 주변 암석에 영구적 팽창이나 수축을 야기하기 때문에 지진의 인근에서 가능한 것으로 추정된다. Offset이 발생되는 현상에 대한 연구를 종합해 보면 다음과 같은 특성이 나타난다.

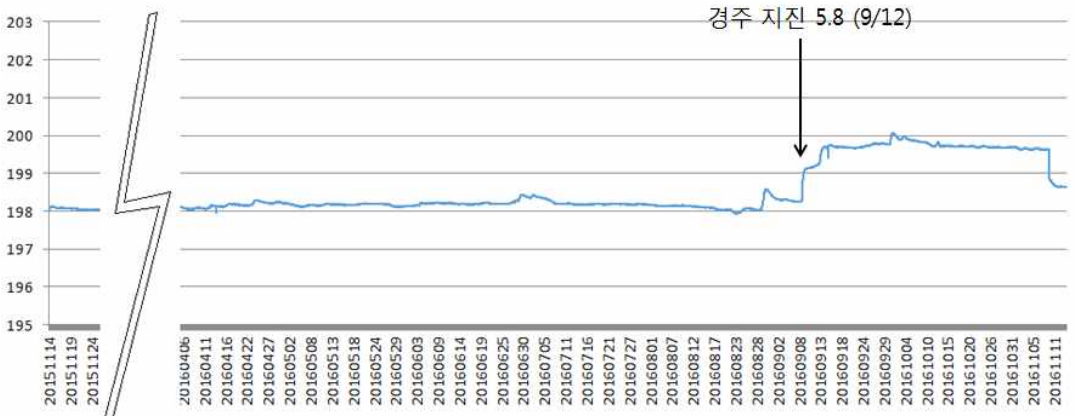
- 일부 우물이 offset 발생 영역 내에 위치할 수 있으나 대부분은 밖에 위치하는 경향을 보인다.
- 이 영향을 받는 우물은 항상 일정한 방향으로 offset(up 또는 down)이 발생된다.
- 온천의 경우에 offset이 보다 자주 발생한다.
- 1989년 Loma Prieta 지진시에 offset에 의한 상승이 1 m 정도 나타난 것으로 보고된 바 있다.
- Offset은 지하수위 측정 주기보다 짧게 순식간에 갑자기 나타나기도 하고, 최대치를 보이는데 수일이나 수 주 정도 소요되기도 한다. 반응이 느린 경우는 1차원의 지하수 확산 모델과 같은 곡선형태의 변위를 보이는데 이는 지진파가 우물 주변 지역(우물 내부가 아닌)에서 지하수위를 동시에 변화시키기 때문이다.
- Offset은 얕은 지하수위에 국한되지는 않는데, 1999년 Hector Mine 지진의 경우에는 2.6 km 깊이의 단열대와 연결성이 있는 유체에서 발생되기도 하였다.
- Offset을 보이는 우물의 경우, 지진규모와 거리관계의 임계값이 존재하는데 이를 통하여 offset의 존재 여부를 예측할 수 있다. 즉, 20 km 떨어진 지점에 규모 5가 step을 발생시켰다면 400 km 지점에서는 규모 7 정도가 필요할 것으로 예상할 수 있다.

이와 같은 offset이 발생되는 기작은 여러 가지가 있는데, 1) 얕은 우물에서 상승 step이 발생되는 경우, 액상화와 같은 상부의 충적층의 압축 현상이 발생하거나, 2) 공극으로부터 탈출되는 소량의 가스가 유체압의 감소를 가져오거나, 3) 지진파에 의해 야기되는 유동에 의하여 균열의 이완에 의한 투수성 변화가 발생하거나, 4) 온천공의 경우에, 지진에 의하여 동기화된 뜨거운 유체의 상승이 열적 압력을 유발하기도 한다. 우물이 원거리에 위치한 경우에 지진파는 순간적으로 발생되나 수일 동안 지속되도록 하는 트리거 역할을 한다.

지진과 인접한(20 km 이내) 지역의 경우 피압대수층은 단층의 offset에 의하여 항구적 변형에 대한 반응을 보이게 되며, 지진파는 다양한 방법으로 지하수위 변동을 야기하는데 피압 및 자유면 대수층에서 모두 나타날 수 있다. 항구적 변형에 의하여 반응하는 지하수위 변동은 수분 또는 수개월간 지속될 수 있으며, 지진 인접 지역인 경우에 이 시간 규모는 대수층 깊이의 제곱을 상부 지층의 수직 수리확산도(Vertical Hydraulic Diffusivity)로 나눈 것에 해당한다. 또한 step 형태의 변동은 수주 또는 수개월에 걸쳐 회복되는 경향이 있다. 이 회복 작용은 수문 시스템의 경계부로의 지하수 유동에 의하여 발생되는데 소요되는 시간은 경계부까지의 거리와 수리확산도(Hydraulic Diffusivity)에 의하여 지배 받는다.

그림 2.1.1은 경주 인근에 설치되어 운영 중인 국가지하수관측망(경주산내 암반관측정)의 지진 발생시 지하수위 변동 사례를 보여준다. 지진 발생 전후로 약 2 m의 지하수위 상승이 step 형태로 발생되고 있음을 잘 보여준다. 특히, 본 관측 지점은 지진 발생 이전 과거 1년간 지하수위 변동 폭이 0.5 m 이내로 매우 안정적인 변동성을 보여주었는데, 지진 발생시 급격한 수위 변동이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 위에서 언급한 대

수층의 수축 팽창에 의한 현상으로 보인다.

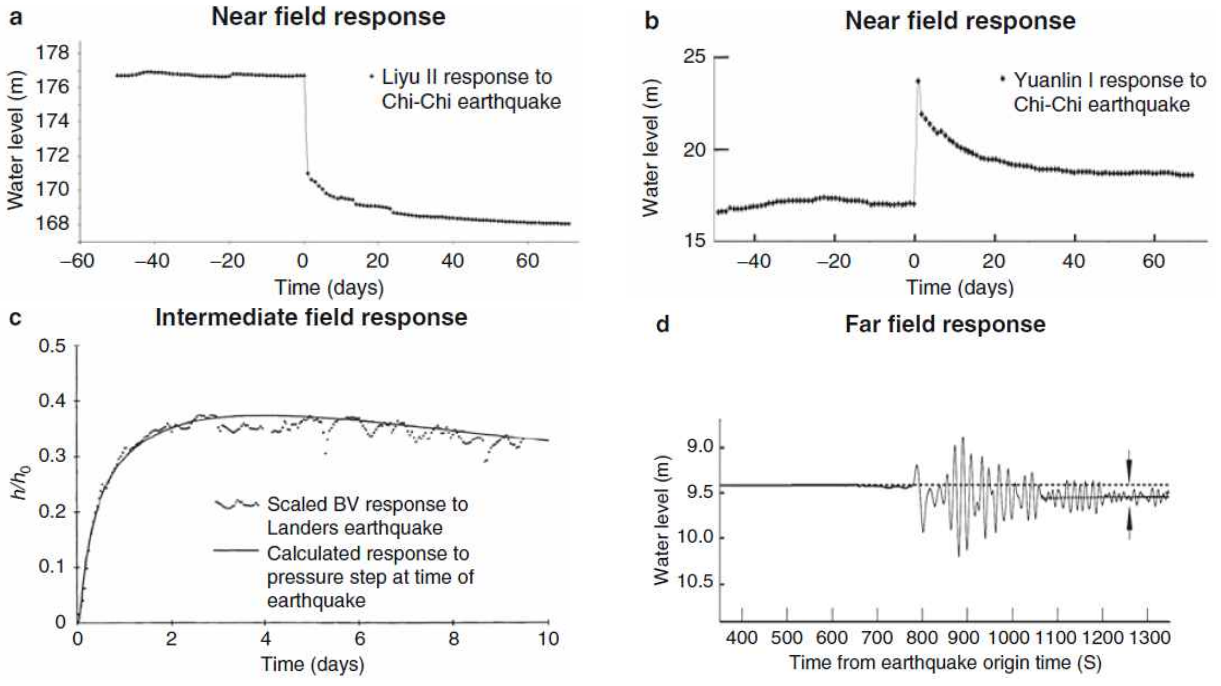


[그림 2.1.1] 경주 지진시의 지하수위 변화

2. 해외 사례

대규모 지진은 지표아래의 유동 및 유체 특성의 변화를 가져온다. 놀라운 점은 2004년 M 9.2 수마트라 지진 직후 진원지에서 3200 km 떨어진 중국 남부의 모니터링 관정에서 지하수가 분출되었다. 지표면에서 처음 발견되었을 때, 물이 분수처럼 뿜어져 나온 높이는 수심 50-60 m 높이에 도달했다.

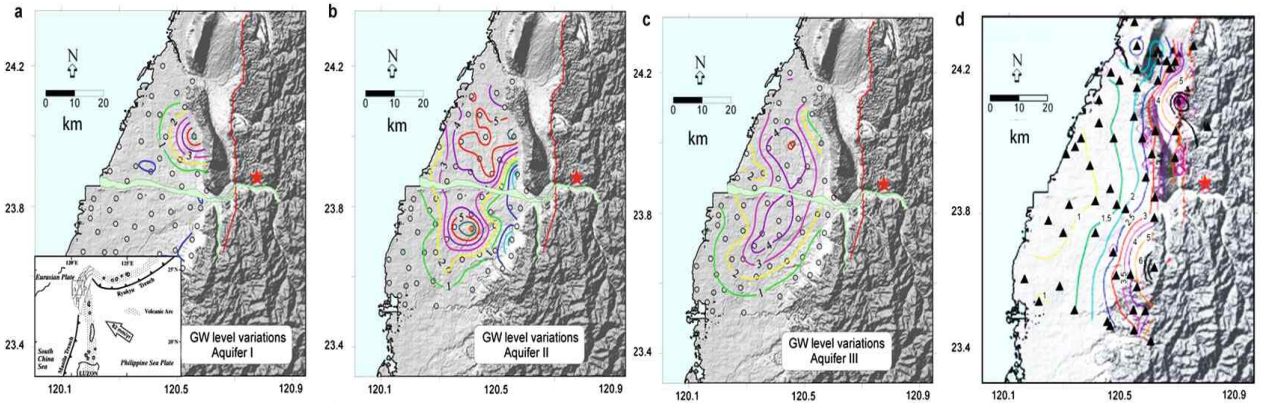
그림 2.2.1은 해외에서 연구된 지하수위 변동 현상으로서, 지진시 지하수위가 급강하 한 사례, 지진시 지하수위가 급상승한 사례, 실제 지하수위 변동과 모델 결과의 비교, 지진 후 변동을 보이던 지하수위가 이후 고정적으로 값으로 변화되어 나타나게 되는 경우 등 다양한 형태의 지하수위 변동이 발생된 바 있다.



[그림 2.2.1] (a) Chi-Chi 지진시의 지하수 관측정내 지하수위의 급강하 사례, (b) Chi-Chi 지진시의 지하수 관측정내 지하수위의 급상승 사례, (c) 지하수위 변화(점선: 실측값, 실선: 모델예측값), (d) 지하수위 Oscillation 사례 및 지하수위 영구 강하 유지 특성(12 cm 하강)

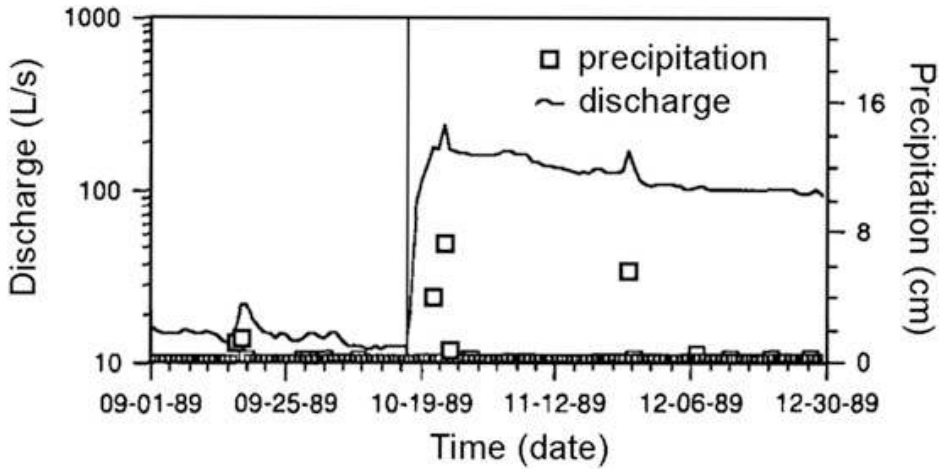
지진으로 인한 지하수 변화는 예전부터 기록되어왔다. 그러나 지진 발생시 지층의 지하수 변화에 대한 기록은 지난 수십 년 전부터의 기록만 있다. 큰 지진 후에 수위변화는 단층으로부터의 거리에 따라 변한다. 예를 들면 대만의 1989년 규모 7.6 Chi-Chi 지진 발생시 지하수위는 급격히 감소했다(그림 2.2.1(a)). 또한 진원지 주변지역에서 수위는 계단식 증가를 나타낸다(그림 2.2.1(b)). 지진후의 새로운 지하수 수위는 시간이 지남에 따라 새로운 평형에 기하급수적으로 돌아간다(그림 2.2.1(a, b)).

지하수 모니터링을 위해 유역에 200개의 수문을 설치하였으며, 우연히 지진으로 인한 지하수위와 온도변화를 포착했다. 기록에 따르면 충적층은 홀로세자갈, 모래 및 해양 점토로 이루어져 있으며 자갈과 진흙의 비율은 해안에서 상층까지 증가하고 있다. 충적층 아래에는 두께가 3~5 km인 Pliocene-Pleistocene 대기층이 충돌 전경분지에 놓여있으며 이 층은 두꺼운 셰일을 덮고 있다. 큰 지진과 비교적 단순한 지질학적 구조, 그리고 수문학적 관측소의 조밀한 네트워크가 이 데이터 세트를 포괄적이고 체계적으로 만들었다. 피압대수층에서 Chi-Chi 지진 후의 지하수 수위 상승은 단층으로부터의 거리에 따라 20~30 km 떨어진 거리에서 최대 5 m의 수위가 감소한다(그림 2.2.2(b)). 반면에 자유면대수층은 지하수 수위에서 체계적인 변화를 보이지 않았다(그림 2.2.2(a)). 이러한 지하수 반응 패턴은 가속도가 지진 발생원으로부터의 거리에 따라 단조 감소를 나타내기 때문에 예상치 못한 결과이다(그림 2.2.2(d)). 따라서 지표 진동의 강도와 일치하는 지하수 수위 변화를 기대하는 것이 당연하다. 예상치 못한 지하수 반응 패턴은 지진 발생시 토양 및 퇴적물의 거동에 강한 비선형성을 반영한다. 10개까지의 파열된 단층길이 근처의 거리와 거리를 넘어서는 지하수 수준의 변화는 양수 또는 음수일 수 있으며, 근거리에서의 반응과 같은 단계 대신에 변화보다는 점진적이고 지속된다. 충분하게 많은 수의 우물로부터 수집된 자료가 수거되고 조사될 때 수위의 변화는 부호와 크기 모두에서 통계적으로 무작위적인 발생을 보여준다. 우리는 근처 지반의 수위반응과 중간영역의 사이에서의 구별이 비 퇴적물에 설치된 우물로부터 관측하는 것에 커다란 기점을 두고 있다는 것을 알 수 있다.



[그림 2.2.2] Chi-Chi 지진 당시의 Choshui River 지역에 대한 지하수 수위의 변화 분포. (a) ~ (c)의 원과 등고선은 지하수 모니터링 지점과 지하수 수위의 변화가 다른 대수층, ★는 Chi-Chi 지진 진원지, 붉은색은 단층을 보여준다. (d)의 삼각형 및 등고선은 지진 통계국의 위치와 최대 가속도의 공간 분포를 나타낸다(Wang et al. 2003에서 수정)

지진 후의 하천 유출량의 변화는 부분적으로는 직접 관찰되었기 때문에 가장 흥미로운 수문학적 반응 중 일부이다. 또한 점 측정보다는 지구 표면 아래에 있는 대량의 부피에 걸쳐 통합된 반응을 나타낸다. Streamflow 변경 사항은 정량적으로 오랫동안 문서화되었다. 예를 들어, 20 세기 초 미국 지질 조사국(US Geological Survey)에 의해 설립 된 미국 서부의 시냇물 게이지(gauge)는 길고 지속적인 계량 측정을 수집했다. 지진에 따른 지표 수 문학의 변화에는 지진 단층 현상에 의해 생성 된 즉각적인 폭포, 산사태와 암초에 의한 산 계곡의 하천 차단, 높은 지대에서 낮은 고도에 이르는 많은 양의 눈이 해빙됨에 따른 방류량 증가. 더 흥미롭고 잘 알려지지 않은 것은 지진을 쫓아 오랜 기간(보통 수주에서 수개월 동안) 지속되는 하천 유출량의 증가이지만 명백한 원인은 없다. 이 유형의 극적인 예는 하천 유출이 매우 낮았던 캘리포니아의 장기간의 가뭄 동안 발생한 1989년 Mw 6.9 Loma Prieta 지진 이후의 유선 흐름 증가였다(그림 2.2.3). 지진 발생 후, 진원지에서 약 50 km 이내의 많은 하천들이 4~24배의 증가 된 배출량을 보였으며 총 배출량은 0.01 km^3으로 추정된다.



[그림 2.2.3] 캘리포니아의 Loma Prieta 지진 전후의 San Lorenzo 강의 유량변동

지진 동안의 액상화는 포화 된 퇴적물의 강성이 0으로 감소되고 퇴적물이 유체처럼 되는 과정이다. 이 공정은 액상화 중에 물과 퇴적물이 상당한 높이로 배출되는 것으로 나타난다. 기원전 고대 그리스의 해안 마을인 헬리스(Helice)는 액상화 및 침하의 결과로 바다 밑으로 완전히 사라진 바 있다. 1964년 M 9.2 알래스카 대지진 이후 앵커리지, 수어드 및 발데즈 근처의 연안에서 큰 피해가 발생했는데 완만한 경사면 아래에서 부드러운 점토와 모래가 액화됨으로써 토지의 침하가 발생한 바 있다(Seed 1968). 뉴질랜드 남섬의 2010-2011년 캔터베리 지진(2011년 M 6.2 크라이스트 처치의 가장 큰 지진을 포함)이 진행되는 동안, 재발하는 액상화로 인해 수천 개의 주거용 건물이 손상을 입었고 경제적으로 손실이 발생한 바 있다(Quigley et al., 2013).

San Lorenzo 배수 분지(캘리포니아 주, 센트럴)의 하천수 화학은 2년마다 두 지점에서 관측되었는데, 1989년 10월 17일의 Loma Prieta 지진 이후에 하천 수질 화학은 전반적인 이온 강도의 현저한 증가를 보였으나 상대적인 비율은 지진 전과 거의 동일한 것으로 나타났다(Rojstaczer and Wolf 1992). 이온 농도는 지진 발생 후 몇 개월 동안 현저히 감소하는 현상이 나타났으며 지진 이전의 조건과 유사하게 회복되었다.

3. 국내외 연구 및 특허현황

○ 국내 연구에서는 지질과 심도에 따른 라돈 농도 및 지화학적 특성에 관한 연구(○○○ 외, 2012, 2014; ○○○ 외, 2013, 2014)와 지구화학환경에서의 라돈농도 분포와 라돈농도의 지배요인 연구(○○○, 2000)에 의하면 파쇄대와 라돈 농도의 뚜렷한 상관성은 나타나지 않았고 단층지대에 위치한 일부지역에서 토양가스 중 라돈의 농도분포는 단층작용의 구조적인 영향을 받아 이동성이 증가하여 확산모델로는 설명할 수 없는 라돈이상치가 나타났지만 이를 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것이라 언급하였다.

○ 국내에서 처음 실시된 라돈방사능농도의 측정을 통한 지진발생 예측에 관한 연구(○○○ 외, 2003)에서는 1980년도부터 2001년 6월까지 한반도 지진발생 현황에 대한 데이터베이스를 구축하고 라돈 발생량을 연속적으로 관측할 수 있는 관측장비를 이용하여 관측된 자료와 관측기관 중에 발생된 국내 및 주변지역의 지진 발생자료와의 스펙트럼 분석 결과를 제시하였다. 연구결과, 지진발생 전에는 높은 라돈 농도를 나타냈으며, 지진발생시 낮은 농도를 나타냈다. 이로써 라돈의 변화량이 지진예측에 관한 기초자료로 활용될 수 있음을 제시하였다.

○ 지진 예보를 위한 라돈 가스 측정 시스템 및 방법은 2009년 출원한 특허로 이는 지진 발생 예상 지역에 시추된 시추공의 지하수로부터 라돈가스 농도를 측정하는 시스템 및 방법에 관한 것이며, 라돈 농도 측정기, 패커, 에어펌프로 구성되어 지하수위와 라돈 농도를 측정할 수 있는 방법이 과거에 발명되었다(출원번호 1020090084848).

○ 지하수 모니터링 이상변동 자료를 이용한 소규모 지진 영향 유추에 대한 연구(○○○ 외, 2015)에서는 지하수위, 수온 및 EC 값의 시계열 자료의 급격한 이상변동을 소규모 지진의 전조 영향으로 해석하였다.

○ 일본 지진에 의한 국내 지하수 수위 영향 평가(○○○, 2011)에서는 일본에서 발생한 강진이 대한민국 대수층의 지하수위에 미치는 영향에 대한 연구를 진행했다. 그 결과, 지진의 영향으로 지하수위가 순간적인 상승 및 하강 이후 수위회복을 보였고 이와 달리 지하수위가 변동된 이후 지속적으로 상승 및 하강하는 경우도 발생했다.

○ 지진에 의한 지하수위 및 지표수의 유출량 변화는 잘 알려져 있으며(Rikitake, 1975), 정량적인 측정이 가능한 지하수위와 수질 변동은 지진 감시와 예보에 효과적일 것으로 보도된 바 있다(Chen et al., 2000; Che et al., 2006).

○ Rammana의 연구에서는 Koyna 지역 관정을 이용하여, 1997년과 1998년에 각각 일어난 중규모 또는 작은 규모 지진에 의해 지하수위가 변할 수 있다고 결론 내렸으며, 이런 지하수위 반응에 대한 연구는 이 외에도 다양한 진앙으로부터 거리에 따른 지하수위 변동 양상을 분석하는 연구들이 이루어졌다(Roeloffs et al., 2003; Liu et al., 2006; Chadha et al., 2008).

○ 지진예측 연구 사례 중 일본에서 조사된 연구결과에 따르면 1991년 2월 아토츠가와(跡津川) 단층 내 규모 3.9의 지진 전후에서 라돈 농도가 30% 정도 변화한 것이 확인되었다.

○ 지진 발생 이전에 지각의 팽창과 변형에 의해 지하수의 지화학적 변동이 일어날 수 있는 가능성이 충분히 존재하며, 1995년 M7.2의 고베 지진이 발생하기 전 지하수의 라돈 농도가 급변한 것으로 알려져 있다(Igarashi et al., 1995; Tsunogai and Wakita, 1995).

○ 단층지대에서 하투다(Hatuda 1953)가 수행 한 연구는 1984년 9월 나가노현 이전에 라돈 농도의 변화에 대한 연구를 통해 지진이 일어나기 3개월 전에 라돈 카운트가 점진적으로 증가하고 2주전에 현저하게 증가한 것을 관찰하였음. 이를 통해 일본 동부에서 지진 예측을 목적으로 도쿄대학과 일본 지질조사국이 지하수 라돈 모니터링 네트워크를 광범위하게 운영하였으며 연구중 라돈 농도의 이상 증후를 파악하였음.

○ 1979년부터 1980년까지 알레그리(Allegri et al., 1983; Pulinets and Boyarchuk, 2004; Pulinets et al., 2007) 등은 중부 이탈리아에 위치한 지역에서 지진과 라돈 함량을 측정하였으며, 실제로 1980년 6월부터 11월까지 로마와 리에티 지역에서 라돈함량의 변화를 발견하였음. 라돈함량을 측정하기 위해 지하수를 채취하였으며 이상 징후 변화폭은 배경수준에 비해 25%와 170%로 측정되었는데, 이때 1980년 11월 로마와 리에티에서 약 250 km 떨어진 이탈리아 남부에서 강한 지진이 발생한 것으로 확인되었음(M=6.5).

4. 기술개발 성숙도

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	□	□	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	■	□	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	□	□	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	□	■	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	□	□	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	□	□	TRL 6 유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	□	□	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	□	□	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	□	□	TRL 9 현장적용/사업화 단계

○ 본 연구에서는 전 세계적으로 지하수와 지진과의 관계의 명확한 이론적 근거가 확보되지 않은 기술로서 결과의 신뢰성에 대한 타당성을 검증하는 수준의 연구를 진행하며, 지하수내 라돈222 실시간 계측이 가능함으로 과거 연구되었던 지하수와 지진과의 관계 연구보다 더 진보한 형태의 연구가 가능하다. 또한, 향후 지진현장에서 지하수를 활용한 지진계측시스템이 구현될 수 있는 기초 단계의 연구에 해당된다.

○ 위 연구 과적은 TRL 2단계부터 4단계까지의 과정을 모두 포함한다.

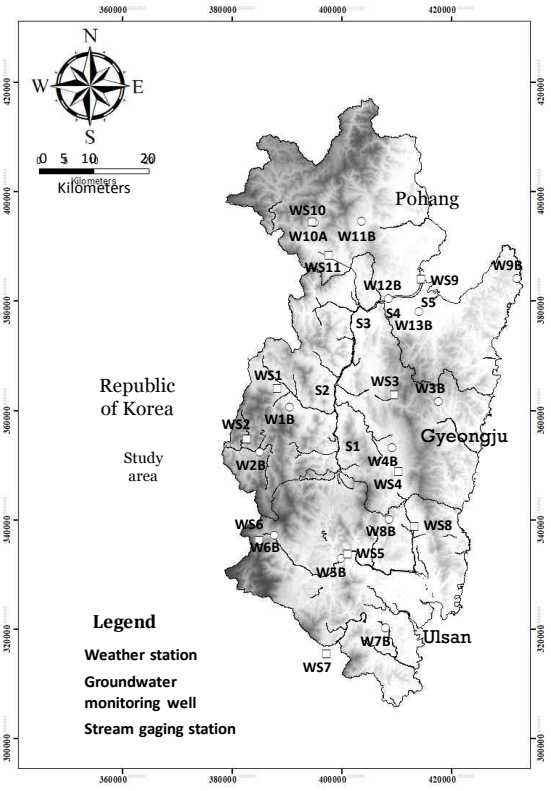
제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구 지역

○ 연구지역 위치

경주시는 경상북도 남동부에 위치하며 동측은 동해안, 서측은 청도군과 영천시, 남측은 울산광역시, 북측은 포항시와 접하고 있다. 동서측의 동대산계와 단석산계에 따라 해안, 평원, 산악지방으로 구분되고 산맥에 따라 동서로 하천이 흐르며 중앙부 형산강을 주변으로 좁고 긴 평야가 펼쳐져 있다(그림 3.3.1).

포항지역의 산계는 대체로 양산단층대의 방향과 유사한 N10~20E 방향성이 가장 우세하며, 이외에 양산단층에서 파생된 단층들의 방향을 따른 N60~70W의 소규모 산계들이 발달되어있다. 양산단층대의 동측은 제 3기 퇴적암이 주로 분포하고 있는 지역으로 해발고도 200 m 미만의 얕은 구릉성 산지를 이루며, 제 3기말에 지속된 화산활동과 제 4기의 태백산맥형성과 동해안의 융기작용으로 소구릉지 및 요철지형이 형성되었으며, 그 후 지각변동에 의해 형산강과 영일만 및 장기반도가 형성되었다(그림 3.1.1).



[그림 3.1.1] 연구지역 위치도

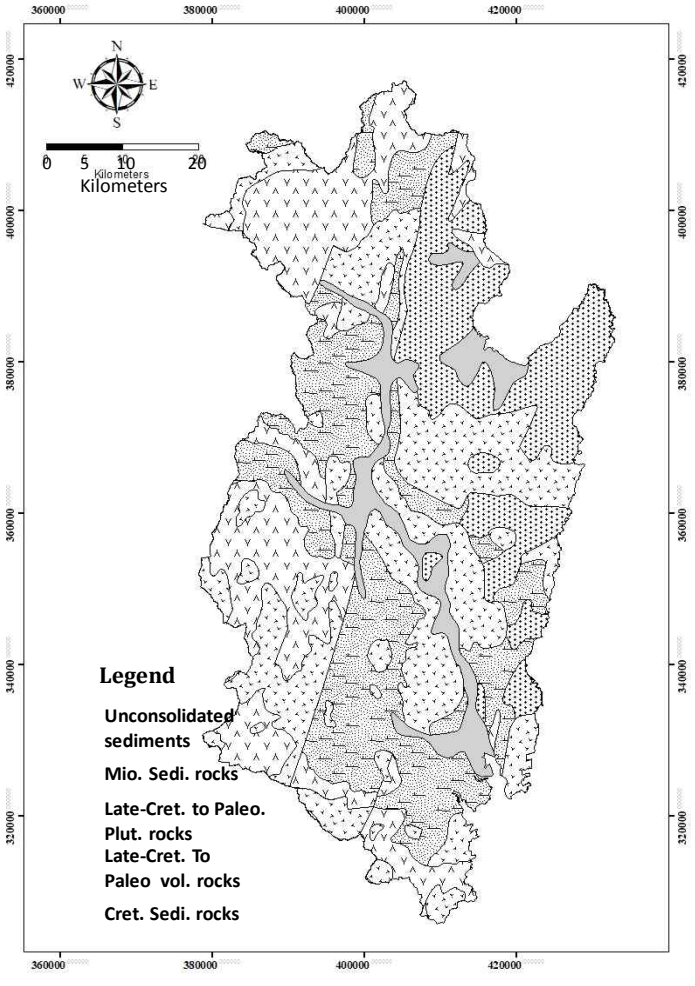
○ 연구지역 지질특성

경주지역의 지질은 중생대의 하양층군과 유천층군으로 구성된 경상누층군을 기반암으로 하여 이들을 관입한 화산암 및 불국사 관입암으로 구성되며 이들의 부정합으로 덮는 신생대 제 3기의 장기층군 범곡리층군, 연일층군과 이를 관입한 화산암류 등으로 구성되어 있고 가장 상위층으로 제 4기 테일러스와 충적층이 피복하고 있다(그림 3.1.2).

포항지역의 지질은 중생대 백악기의 퇴적암류와 이를 관입한 화성암류 및 화산암류, 그리고 신생대 제 3기 퇴적암류와 화산암류 및 화성암류로 구성되어있다. 양산단층과 울산단층을 경계로 서측은 중생대 백악기 화산암류 및 화강암류가 대부분의 분포를 보이고, 경상분지의 퇴적암층은 비교적 좁은 분포를 보이고 있다. 동측은 주로 신생대 제 3기의 포항분지내의 퇴적층들이 분포하며, 남측에 일부 화산암류와 화강암류가 분포하는 양상을 보인다(그림 3.1.2).

- 미고결퇴적층(Unconsolidated sediments, 안동충적층(Qa)): 현세 충적층들이 현, 구하상을 따라 혹은 지형학적으로 저지에 분포한다. 자갈, 모래, 뻘 등으로 이루어지며 특히 하천을 따라 하성층이 잘 발달하며 동해안을 연하여 해성의 자갈, 모래층의 발달이 활발하다. 또 자갈, 모래층으로 전술한 것들과는 구분이 되는 고기 충적층들이 하천이나 해안선을 따라 단구층으로 발달하고 있으나 규모의 연속성 혹은 분포면적이 극히 제한되고 있다.
- Mio. Sediment rock(안동 연일층군중부연일층군(Te2)): 학림층, 홍해층, 이동층이 이에 포함되며, 사암, 역암, 역질사암 및 셰일로 구성된다. 대체로 포항 부근에서는 역암의 협재가 빈약하나 북쪽 청하쪽으로는 역암이 함유되는 빈도가 높다. 비교적 하부의 약간의 탄질물을 협재하는 곳도 있으나 연속성이 없다. 층후는 포항지역에서 370 m 내외이고 청하도폭 지역에서는 약 160 m 정도이다.
- Late-cret. to Paleo. Plut. rocks(부산 산성화산암(Tav)): 경북 포항에서 남쪽으로 경주시 감포읍에 이르는 방향으로 넓게 응회암 및 응회질암(truffite)이 분포한다. 유문암질 용결응회암, 유문암질결정질응회암, 응회질사암, 응회질역암 등으로 이루어진다. 응회암은 대부분 유문암질이며 유문암질 암편이나 석영, 장석립들을 포함하고 있다. 경상누층군 진동층의 셰일 및 사암을 부정합으로 피복하며 부분적으로는 심하게 각력화된 부분도 있다. 어일층군이나 장기층군 퇴적분지의 기저를 이룬다.
- Late-Cret. To Paleo vol. rocks(부산 유천층군안산암, 안산암질응회암(Kat)): 주사산 안산암질암류는 안산암질 용암과 화산쇄설물이 교호하는 양상으로 산출되며 성층화산의 산물로 추정된다. 안산암질 용암류는 상부 표면에 행인상 구조를 보이기도하며, 적갈색으로 산화되어 있거나 용암류 사이에 적갈색 내지는 녹회색의 응회암질 퇴적층이 협재되어 있기도 한다. 용암류는 사장석 반정을 다량 함유한 반상조직을 나타냄을 특징이다. 사장석 외에 휘석 혹은 각섬석 반정이 소량 산출된다. 안산암질래피리응회암은 2-3 ㎝크기의 암편을 함유하며 부분적으로는 1 m 크기의 암편도 협재한다. 이 응회암의 기질은 회록색 내지 담록색을 띠며 사장석 입자를 다량 함유하는 것이 특징이다. 주사산안산암에 대비되는 중성의 안산암류가 부산지역의 황령산과 장산봉 지역에 분포한다. 안산암류는 안산암질 화산쇄설암과 안산암의 용암으로 구성되며 서로 교호하여 산출 된다. 이와 같이 교호를 이루는 부위의 암석은 곳에 따라 퇴적 양상을 보이기도 한다. 이는 층상화산활동의 산물로 해석된다. 층상의 퇴적양상은 장산봉 해안에서 잘 나타난다. 안산암질 화산쇄설암은 화산각력암, 응회각력암, 래피리응회암, 응회암으로 구성되고 안산암은 휘석암산암, 각섬석안산암으로 구성된다. 야외에서 이들 안산암은 회녹색 내지는 암녹색의 암색을 띄며 장석류의 반정이 함유되어 있다.

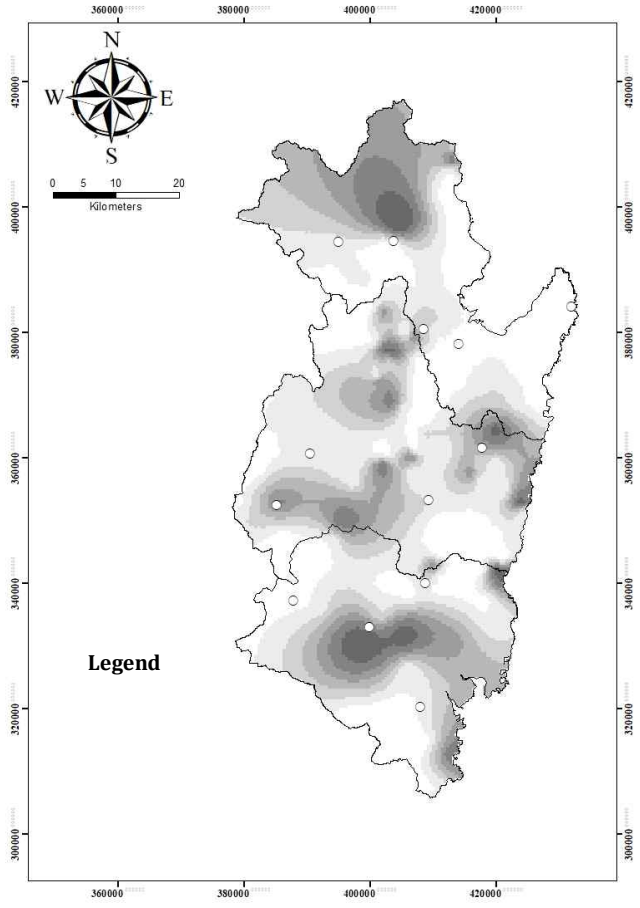
- Cret. Sedi. rocks(부산 하양층군진동층(Km7)): 도폭 전역에 가장 넓게 분포를 보이는 백악기 퇴적암류로 서쪽은 대구시로부터 남쪽으로 사천시까지 동쪽으로는 울산시까지 분포한다. 그러나 양산단층대 이동지역의 퇴적암류들은 아직까지 명확한 층서대비가 이루어지지 못하고 있다. 이들은 일반적인 진동층의 암상과 유사한 흑색 셰일로 이루어지며 회록색의 쳐트질 물질들을 흔히 포함하고 있어 부산도폭에서는 이들이 진동층에 대비될 것으로 보았다. 그러나 울산 부근에서는 다량의 저색층이 함유되고 있어 이들 중 일부는 진동층 하부의 함안층에 대비될 가능성도 배제할 수 없다. 주로 암회색 내지 흑색 셰일로 이루어지며 실트암이나 사암, 역암 또는 석회질 셰일이 협재한다. 층리의 발달이 양호하고 박리상으로 잘 분리된다.



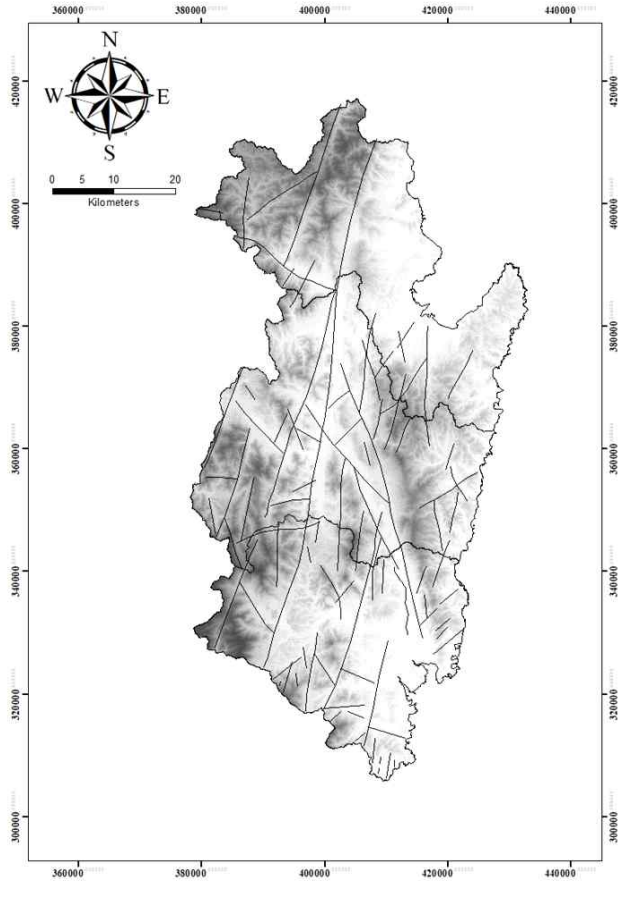
[그림 3.1.2] 연구지역 광역 지질도

○ 연구지역 수리전도도 및 지질구조선 분포 특성

연구지역의 수리전도도는 국가지하수관측망 14개소(충적, 암반)의 수리전도도와 경주, 포항, 울산지역의 기초조사보고서에 수록된 충적 및 암반 184개 관정의 시추조사, 입도분석결과, 양수시험의 수리전도도 자료를 활용하여 경주, 포항, 울산의 수리전도도 분포도로 작성하였다(그림 3.1.3, 표 3.1.1). 그림에서 보는 바와 같이 북북동 방향의 양산단층 및 주변 단층을 따라서 수리전도도가 상대적으로 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 지질구조선의 분포를 보면, 북북동방향의 주요 단층대를 따라서 지질구조선이 잘 발달하고 있으며, 남남동 방향의 대표적인 구조선도 분포하고 있다(그림 3.1.4).



[그림 3.1.3] 연구지역의 수리전도도 분포도



[그림 3.1.4] 연구지역의 지질구조선 분포도

[표 3.1.1] 연구지역 수리전도도 자료

순번	수리전도도(m/d)	순번	수리전도도(m/d)
W1B	0.0000	KG-38	30.6000
W2B	0.0001	KG-39	9.6800
W3B	0.0002	KG-40	22.8000
W4B	0.0000	KG-41	21.3000
W5B	0.0001	KG-42	44.8000
W6B	0.0000	KG-43	55.3000
W7B	0.0005	KG-44	0.9940
W8B	0.0000	KG-45	0.5650
W9B	0.0000	KG-46	1.8400
W10B	0.0001	KG-47	48.5000
W10A	0.0001	KG-48	7.2300
W11B	0.0000	KG-49	0.0646
W12B	0.0051	KG-50	8.1500
W13B	0.0002	KG-51	1.8200
KG-1	20.4000	KG-52	52.8000
KG-2	7.5000	KG-53	1.3100
KG-3	37.5000	KG-54	52.1000
KG-4	35.1000	KG-55	4.7000
KG-5	51.0000	KG-56	0.4040
KG-6	36.7000	KG-57	0.0282
KG-7	0.2560	KG-58	0.00738
KG-8	33.1000	KG-59	0.8480
KG-9	31.9000	KG-60	0.3190
KG-10	67.9000	KG-61	0.1460
KG-11	3.9000	KG-62	3.2600
KG-12	3.0600	KG-63	0.0646
KG-13	64.2000	KG-64	8.1500
KG-14	24.2000	KG-65	2.9808
KG-15	9.8500	KG-66	0.1296
KG-16	0.1410	KG-67	0.1719
KG-17	0.7320	KG-68	17.8848
KG-18	0.3800	KG-69	0.6791
KG-19	10.2000	KG-70	18.0576
KG-20	1.6700	KG-71	14.9472
KG-21	14.1000	KG-72	0.2324
KG-22	1.0400	KG-73	7.4736
KG-23	44.8000	KG-74	41.8176
KG-24	2.6500	KG-75	0.4441
KG-25	0.0716	KG-76	0.2091
KG-26	0.0905	KG-77	0.1866
KG-27	47.9000	KG-78	22.7232
KG-28	24.7000	KG-79	0.1236
KG-29	16.6000	KG-80	7.1107
KG-30	1.6700	KG-81	0.6705
KG-31	56.0000	KG-82	2.1946
KG-32	57.7000	KG-83	0.0783
KG-33	38.9000	KG-84	0.1166
KG-34	38.5000	KG-85	0.3309
KG-35	9.4300	KG-86	1.6243
KG-36	0.2670	KG-87	0.3862
KG-37	39.4000	KG-88	0.1374

[표 3.1.1] 연구지역 수리전도도 자료(계속)

순번	수리전도도(m/d)	순번	수리전도도(m/d)
KG-89	0.1814	PH-40	2.8500
KG-90	2.3587	PH-41	0.1270
KG-91	0.1763	PH-42	0.1970
KG-92	1.0627	PH-43	0.5100
KG-93	0.6636	PH-44	0.3450
KG-94	0.2652	PH-45	0.1500
KG-95	0.3931	PH-46	1.3900
KG-96	3.4819	PH-47	0.5960
KG-97	0.1987	PH-48	0.8500
PH-1	7.7500	PH-49	0.0240
PH-2	22.7000	PH-50	0.0760
PH-3	113.0000	PH-51	0.1540
PH-4	352.0000	US-1	133.0560
PH-5	0.5590	US-2	231.5520
PH-6	30.9000	US-3	77.7600
PH-7	0.0210	US-4	10.1088
PH-8	10.9400	US-5	66.9600
PH-9	5.4910	US-6	31.1904
PH-10	0.4130	US-7	2.4192
PH-11	3.3460	US-8	372.3840
PH-12	1.4100	US-9	3.2832
PH-13	2.3080	US-10	101.0880
PH-14	0.0160	US-11	47.5200
PH-15	3.1270	US-12	3.3782
PH-16	7.5100	US-13	0.0248
PH-17	6.7640	US-14	0.0129
PH-18	7.7440	US-15	0.0312
PH-19	3.0500	US-16	0.0654
PH-20	0.4090	US-17	54.4000
PH-21	0.0780	US-18	119.0000
PH-22	0.1340	US-19	0.0837
PH-23	0.7490	US-20	0.2730
PH-24	0.0430	US-21	0.0139
PH-25	0.0310	US-22	0.1630
PH-26	0.1290	US-23	0.1320
PH-27	0.0270	US-24	0.0359
PH-28	85.3000	US-25	0.0102
PH-29	0.0250	US-26	0.4360
PH-30	0.4920	US-27	0.0050
PH-31	0.0230	US-28	0.0173
PH-32	0.0480	US-29	0.0423
PH-33	0.4330	US-30	1.6500
PH-34	0.0377	US-31	0.3670
PH-35	30.9000	US-32	5.5600
PH-36	47.0000	US-33	0.0208
PH-37	12.6000	US-34	3.7600
PH-38	0.6750	US-35	0.8060
PH-39	0.5640	US-36	7.7500

○ 연구지역 수계특성

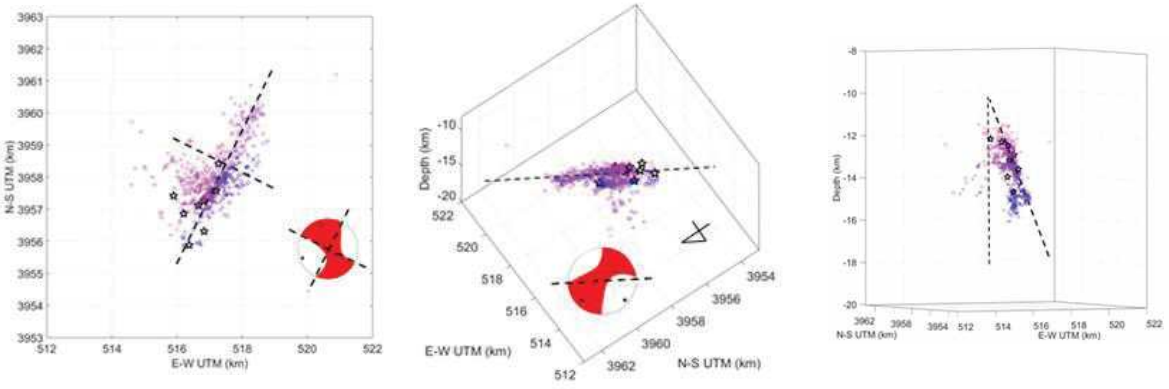
형산강수계는 한반도 남동부(동경 129°01′~북위 35°40′~36°12′)에 위치하여 서쪽으로 낙동강, 남쪽으로 태화강, 동쪽과 북쪽으로는 동해안에 접하는 작은 유역들과 경계를 이루며, 유역면적 1,140 ㎢, 유로연장 63.34 ㎞로 경북 경주시 서면 도리 인내산 삼각점(388.6 m) 동쪽 계곡(심곡천 상류)이 발원지이다. 형산강은 유하하면서 좌측으로부터 이조천, 대천, 소현천, 칠평천이 유입되고 우측으로부터는 남천, 북천을 유입시키고 경주시 강동면의 강동대교에 이르러 유역의 북단에서 남류한 기계천과 합류한 후 유로를 동쪽으로 바꾸어 14.5 ㎞ 유하하여 포항시 남구 해도동에서 동해의 영일만으로 유입된다. 이 중 경주시 탑정동의 대천 합류점에서 하구인 경북 포항시 남구 해도동의 해안선까지 36 ㎞가 국가하천 구간이다. 행정구역으로는 경북과 경남의 2개도로 되어 있으며, 경북의 3개시와 경남의 1개시가 포함된다. 유역의 중상류지역은 신라 천년고도의 경주시가 자리잡고 있으며, 하구부에는 항구공업도시인 포항시가 위치하고 있다. 형산강으로 유입되는 제1지류로는 대천, 남천, 북천, 소현천, 칠평천, 기계천 등이 있다.

2. 지진 현황

○ 경주지진

2016년 9월 12일 19시 44분 33초경 규모(ML) 5.1의 경주지진 전진이 발생했고, 약 48분 후인 20시 32분 54초경 ML 5.8의 본진이 발생하였다(그림 3.2.2(a)). 특히 본진은 계기 지진 관측이 본격적으로 시작된 1978년 이후 최대 규모의 지진으로 기록되었다. 경주지진은 북쪽에서 26~29°동쪽으로 틀어진 북북동-남남서 주향의, 동쪽으로 68~72°경사진 우수향 주향이동 단층면에서 발생한 것으로 해석된다. 경주지진은 2016년 9월 12일부터 2018년 2월 28일까지 주요지진(표 3.2.1)을 비롯한 총 2,232회의 지진이 발생하였으며, 경주지진 진앙은 본진을 중심으로 북북동-남남서 방향에 분포한다(그림 3.2.1(a, b, c)).

경주지진의 여진의 분포 경사는 약 70°로 나타났으며, 여진들의 깊이는 약 11~16 km로 분석된 바 있다. 본진에 해당하는 단층의 길이는 약 4 km정도이고 폭은 약 5 km로 추정된다.



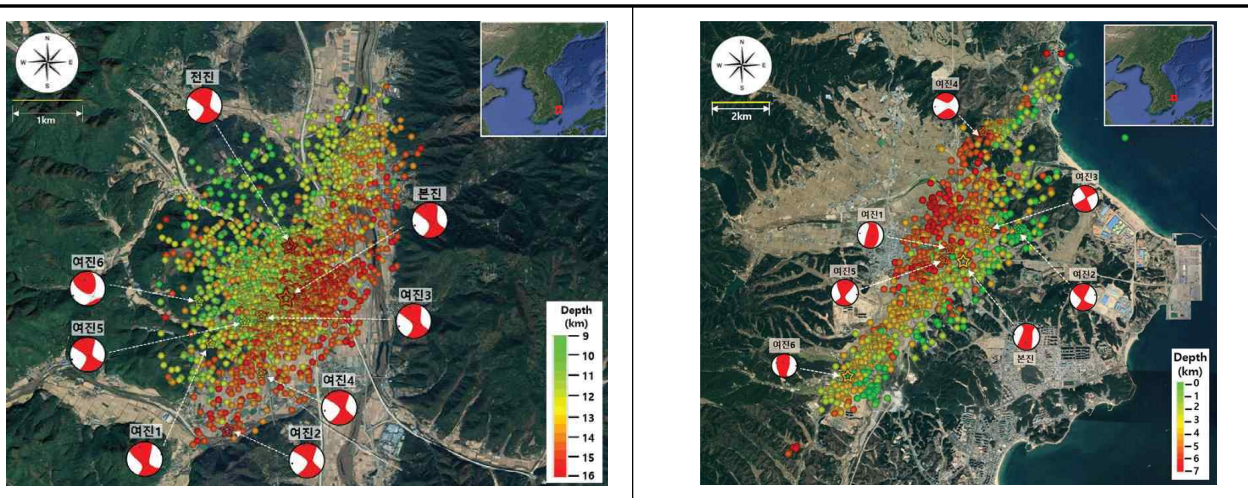
a) 진앙분포 b) 경사 방향의 진원 분포 c) 주향 방향의 진원 분포

[그림 3.2.1] 경주지진 진앙 및 진원분포(KIGAM, 2018)

[표 3.2.1] 경주 및 포항 주요 지진현황

경주지진	TMX	TMY	규모	심도 (km)
전진	398011	254398	5.1	15.0
본진	397973	253675	5.8	14.1
여진1	396898	252796	3.1	12.1
여진2	397179	251570	3.1	15.5
여진3	397603	253223	3.2	13.1
여진4	397630	252401	4.5	13.5
여진5	397378	252796	3.5	12.4
여진6	396713	253403	3.1	12.0

포항지진	TMX	TMY	규모	심도 (km)
본진	413221	292242	5.4	4.0
여진1	412862	292567	3.5	5.5
여진2	414687	293122	4.3	2.0
여진3	413957	293093	3.6	3.9
여진4	413695	295718	3.5	3.7
여진5	412707	292275	3.6	5.6
여진6	410178	289116	4.6	4.3

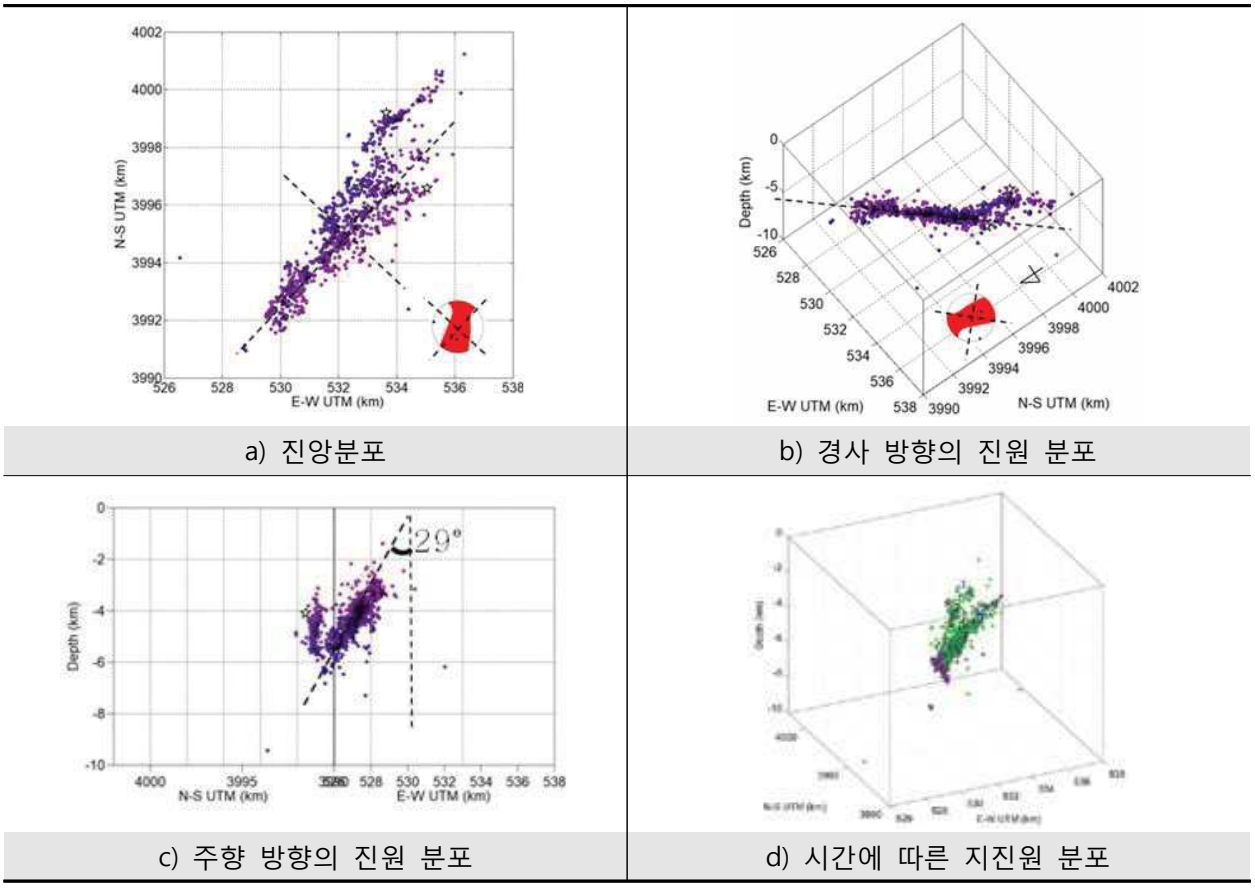


a) 경주지진 위치도 b) 포항지진 위치도

[그림 3.2.2] 경주지진, 포항지진 발생 위치도(KIGAM, 2018)

○ 포항지진

2017년 11월 15일 14시 29분 33초경 경북 포항시 흥해읍 인근지역에서 규모(ML) 5.4의 지진이 발생하였다(그림 3.2.2(b)). 발생 깊이는 약 4 km이며, 단층면해 분석 결과 북동-남서 방향의 역단층성 우수향 주향이동단층(주향 222°, 경사 61°)이다(그림 3.2.3(a)). 포항지진은 2017년 11월 15일부터 2018년 2월 28일까지 주요지진(표 3.2.1)을 비롯한 총 1,350회의 지진이 발생하였으며, 여진들의 위치는 본진을 중심으로 북동-남서 방향으로 주로 분포하고 동에서 서쪽으로 갈수록 진원 깊이가 깊어지는 경향을 보인다(그림 3.2.3(a, b, c, d)). 본진에서 북북동쪽으로 약 3.3 km 떨어진 곳에서 발생한 여진4(2017년 11월 20일 규모 3.6)와 그 주변 미소 지진들은 좁은 범위에서 본진과 별개로 북동-남서 방향으로 위치하고, 깊이 분포 단면에서 경사가 수직에 가까운 형태로 분포하는 것으로 보아 본진의 영향을 받아 주변 단층에서 주향이동 단층운동에 의해 지진이 발생된 것으로 추정된다. 여진들의 깊이별 분포를 확인해 보면 약 3~7 km 범위를 보이고 있으며, 여진들의 분포는 동남쪽으로 약 55° 경사하는 경향을 보여주고 있어 본진과는 다른 단층면을 따라 지진이 발생한 것으로 해석되었다(KIGAM, 2018). 본진의 단층면 길이는 약 7 km, 폭은 약 3.5 km 정도의 단층 움직임을 보여주고 있다.



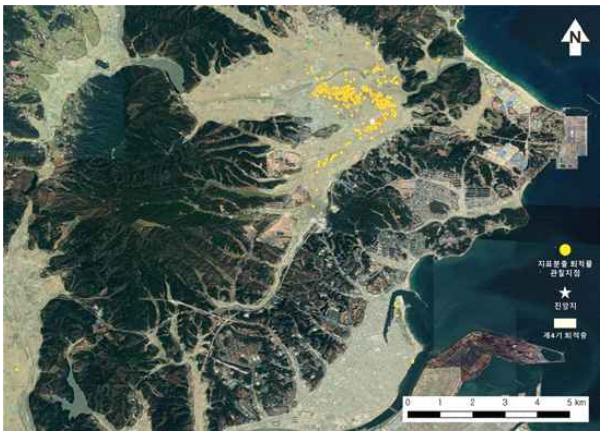
a) 진앙분포 b) 경사 방향의 진원 분포

c) 주향 방향의 진원 분포 d) 시간에 따른 지진원 분포

[그림 3.2.3] 포항지진시 진앙 및 진원 분포(KIGAM, 2018)

○ 포항지진 액상화 현상

포항지진으로 인해 지표균열과 더불어 액상화 현상이 관찰되었다. 액상화란 지진에 의해 토양 내 공극수압이 갑자기 증가하여 고체상태의 지반이 액체처럼 거동하는 현상을 뜻한다. 한국지질자원연구원의 조사에 의하면, 진앙지로부터 반경 15 km 범위에서 약 600여개의 퇴적물의 지표분출(그림 3.2.5)을 확인했으며, 모든 지표분출 퇴적물은 제4기 퇴적물이 분포하는 지역에서 확인되었다(그림 3.2.4). 진앙지 인근(포항시 흥해읍)에서 지표분출 퇴적물은 집중적으로 분포함에도 불구하고, 액상화와 관련된 지반 침하는 관찰되지 않았다. GPR 탐사 결과, 깊이 약 3 m 지점에서 지층의 매질 차이가 급격한 변화를 보이며 깊이 약 6 m 까지 단열이 발달하고 있는 것으로 밝혀졌다. 포항지진으로 인해 발생한 지진동시성 지표지질현상의 분포를 분석한 결과, 진앙을 기준으로 북서쪽 경작지에 액상화 및 모래화산이 집중되는 반면, 동남쪽 지괴에서 비교적 많은 지표균열이 관찰되었다. 북동-남서 방향의 단층 및 단열대는 주로 진앙의 동남쪽 구릉지에서 확인되었으며, 또한 주로 동남쪽으로 기울어진 것을 알 수 있다. 정리하자면, 포항지역에는 북동-남서 방향의 주향을 보이는 단층시스템이 발달하고 이 중 북서 방향의 경사를 보이는 단층 하나가 포항지진과 동시에 파열된 것으로 보인다. 단층파열대는 지표까지 연장되지는 않았으나, 비교적 낮은 심도까지 도달한 것으로 분석되었다(KIGAM, 2018).



[그림 3.2.4] 제4기층 분포도 및 지표분출 퇴적물 관찰지점 현황(KIGAM, 2018)



[그림 3.2.5] 다양한 지표분출 사진(KIGAM, 2018)

3. 관측 현황

연구지역내의 관측은 지하수, 지표수, 강우 등으로 구성되는데, 지하수 관측의 경우에는 경주, 포항, 울산지역 내 국가지하수 관측소 12개소를 대상으로 1시간 간격의 지하수위, 전기전도도, 온도를 측정하고 있으며 약 50~98 m의 깊이, 구경은 150~200 mm로 구성되어 있다(그림 3.3.1, 표 3.3.1). 또한, 일부 관측정에 대해서는 5분 간격의 지하수위 측정을 위한 별도의 수위 측정기(Diver)를 설치하여 조밀한 간격의 데이터를 취득하였다.

지하수위와 밀접한 관련이 있는 강우 및 하천수위 관측 데이터는 주변의 기설치 운영 중인 관측 체계로부터 취득하였다(표 3.3.2, 표 3.3.3).

[표 3.3.1] 연구지역 내 지하수위 관측소 현황

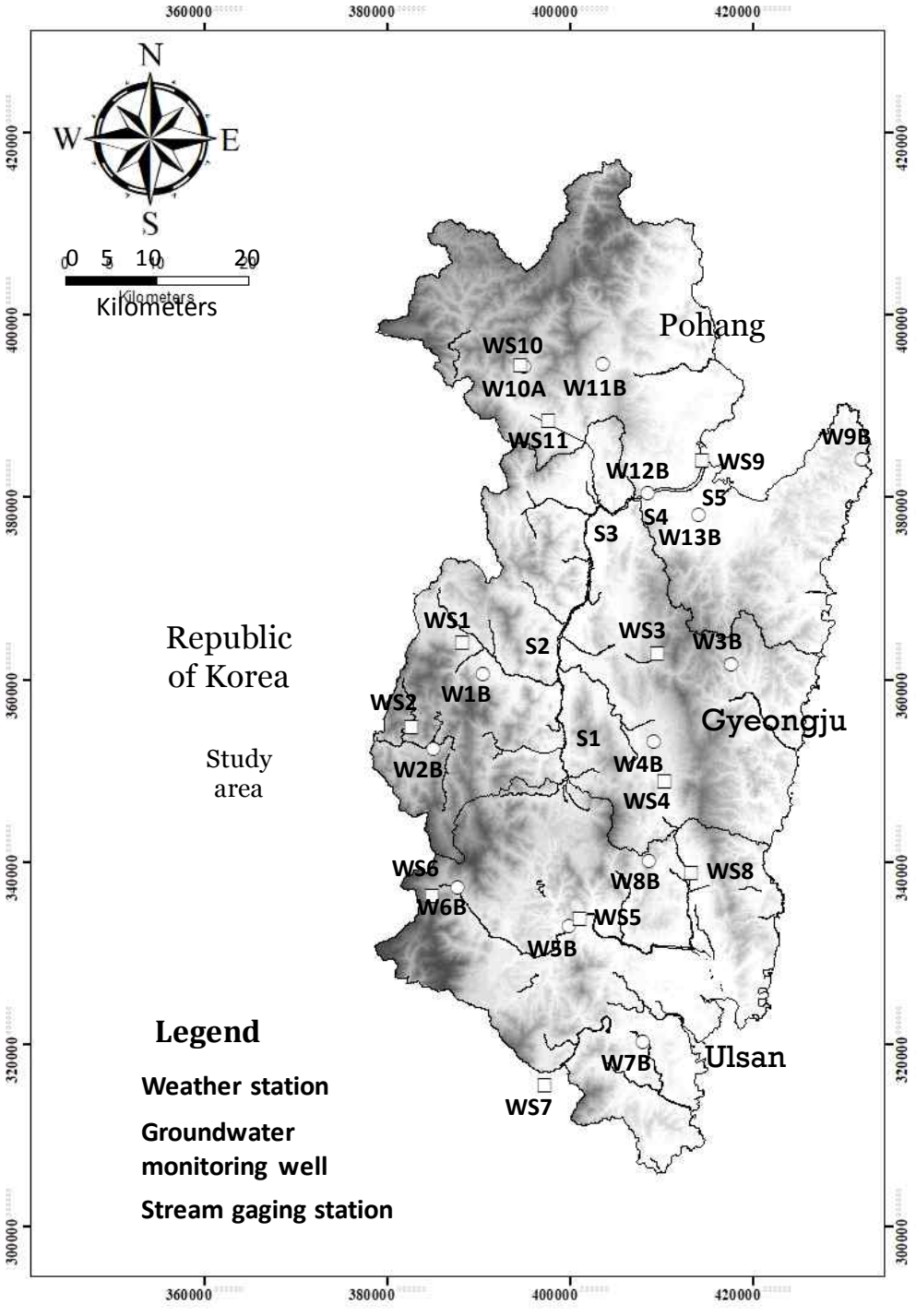
관측소명	X	Y	관정심도 (m)	구경 (mm)	수리전도도 (m/d)	투수량계수 (m^2/d)	해발고도 (El.m)	충적층 두께 (m)
W1B	390469	260590	70	200	9.926×10-6	0.43	89.09	10.0
W2B	385149	252390	65	200	5.321×10-5	2.39	200.04	5.8
W3B	409655	262843	73	150	1.780×10-4	0.05	136.22	-
W4B	410430	248822	98	150	5.821×10-6	5.04	96.80	-
W5B	399885	232973	79	200	9.240×10-5	-	23.76	9.8
W6B	384941	236182	60	200	3.961×10-6	-	198.56	-
W7B	397230	215473	70	200	4.518×10-4	-	12.32	-
W8B	408715	240042	70	200	2.198×10-5	-	57.80	2.4
W9B	414464	284040	70	200	2.198×10-5	-	41.60	-
W10A	394616	294439	10	200	9.945×10-5	-	121.12	-
W11B	403662	294553	79	200	1.396×10-5	-	80.38	2.5
W12B	408334	280281	70	200	5.050×10-3	-	5.89	-
W13B	414057	278096	50	200	1.510×10-4	-	28.73	2.6

[표 3.3.2] 연구지역 내 기상관측소 현황

관측소명	X-coord	Y-coord	Elevation(El.m)
WS1	388267	264049	105.00
WS2	382737	254805	290.00
WS5	401063	233698	31.00
WS8	413352	238742	34.00
WS11	397733	288360	53.80

[표 3.3.3] 연구지역 내 하천관측소 현황

관측소명	수계	유역면적 (km2)	영점표고 (El.m)	조석영향
S1	형산강	445.2	26.585	×
S2	형산강	646.28	9.057	×
S3	형산강	907.57	0.639	×
S4	형산강	971.21	-1.138	×
S5	형산강	1044.1	-1.094	○



[그림 3.3.1] 연구지역내 관측현황

○ 1시간 간격 관측 자료의 지하수 변화

연구지역내 12개소 지하수위 관측자료의 지진 전후의 변화를 보기 위하여 지진이 발생하지 않은 기간부터 2018년 3월까지 자료를 취합, 시계열도를 작성하였다(그림 3.4.1).

기본적으로 1시간 간격으로 측정된 시계열 자료를 토대로 지진 전후의 변화 상태를 개략적으로 파악해 보았다. 12개소 지하수위 관측자료의 지진 전후의 변동성을 보기 위하여 지진이 발생하지 않은 기간과 지진이 발생한 전후 시점인 2016년 9월 이후의 기간으로 구분하여 시계열도를 분석해 보면, 대부분의 관측정에서 지진이 발생하지 않았던 기간의 지하수위 변화 패턴과 지진 이후의 변화 패턴에 약간의 차이가 발생하였음을 볼 수 있다(그림 3.4.1).

일차적으로 지하수 시계열의 특성을 시각에 의존하여 정성적으로 분류해 보았다. 지진 이후 상승 패턴을 보면 지진 이후 peak 형태로 상승하는 경우 (A), 계단상의 형태로 상승하는 경우 (B), 완만한 형태로 상승하는 경우 (C)로 구분이 되며, 상승된 지하수위의 하강 패턴을 보면 빠르게 지수적으로 강하하는 경우 (Ⅰ), 완만한 강하를 보이는 경우 (Ⅱ)로 나눌 수 있다. 또한, 지진 발생 이전 또는 여진의 규모가 약화된 2개월 정도 지난 이후에 특이한 현상을 보이는 경우로서, 지진 발생 이전에 평년의 기저 지하수위 보다 낮아진 경우 (a), 지진 이후에 지하수위가 기저 지하수위 아래로 급감한 경우 (b)로 구분할 수 있다(표 3.4.1).

[표 3.4.1] 2016년 경주 지진 이후의 지하수위 시계열의 변동특성의 정성적 분류

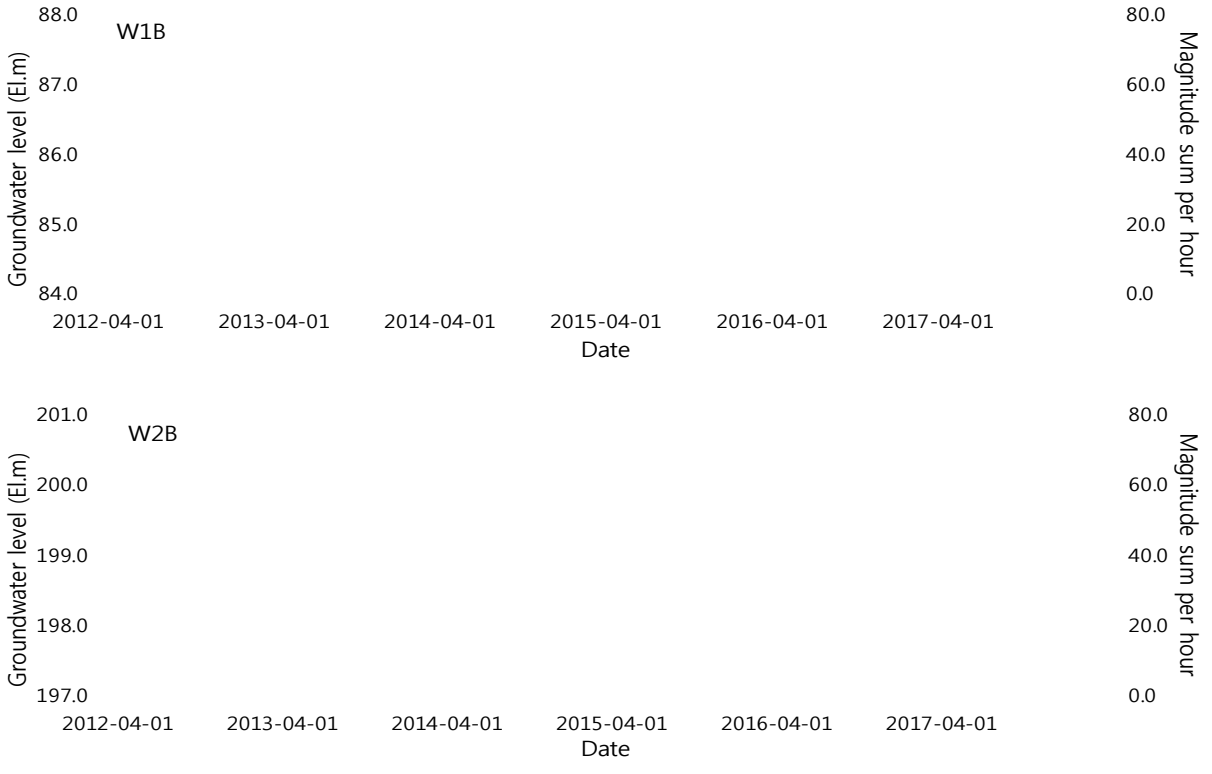
Well	Eq. effect	Increasing pattern	Decreasing pattern	Abnormal changes	Well	Eq. effect	Increasing pattern	Decreasing pattern	Abnormal changes
W1B	△/×	A	Ⅰ	-	W7B	○	A	Ⅰ	b
W2B	○	B	Ⅱ	-	W8B	△	A	Ⅰ	-
W3B	○	A or B	Ⅰ or Ⅱ	-	W9B	△	A	Ⅰ	a
W4B	○	B	Ⅱ	-	W11B	○	C	Ⅱ	a, b
W5B	△/×	A	Ⅰ	-	W12B	○	A	Ⅰ or Ⅱ	b
W6B	○	C	Ⅱ	a	W13B	○	A	Ⅰ	b

Remarks) A: Peak type increase, B: Stair shape increase, C: Slow increase, Ⅰ: Exponentially decrease, Ⅱ: slow decrease, a: lower than base water level before earthquake, b: lower than base water level after earthquake.

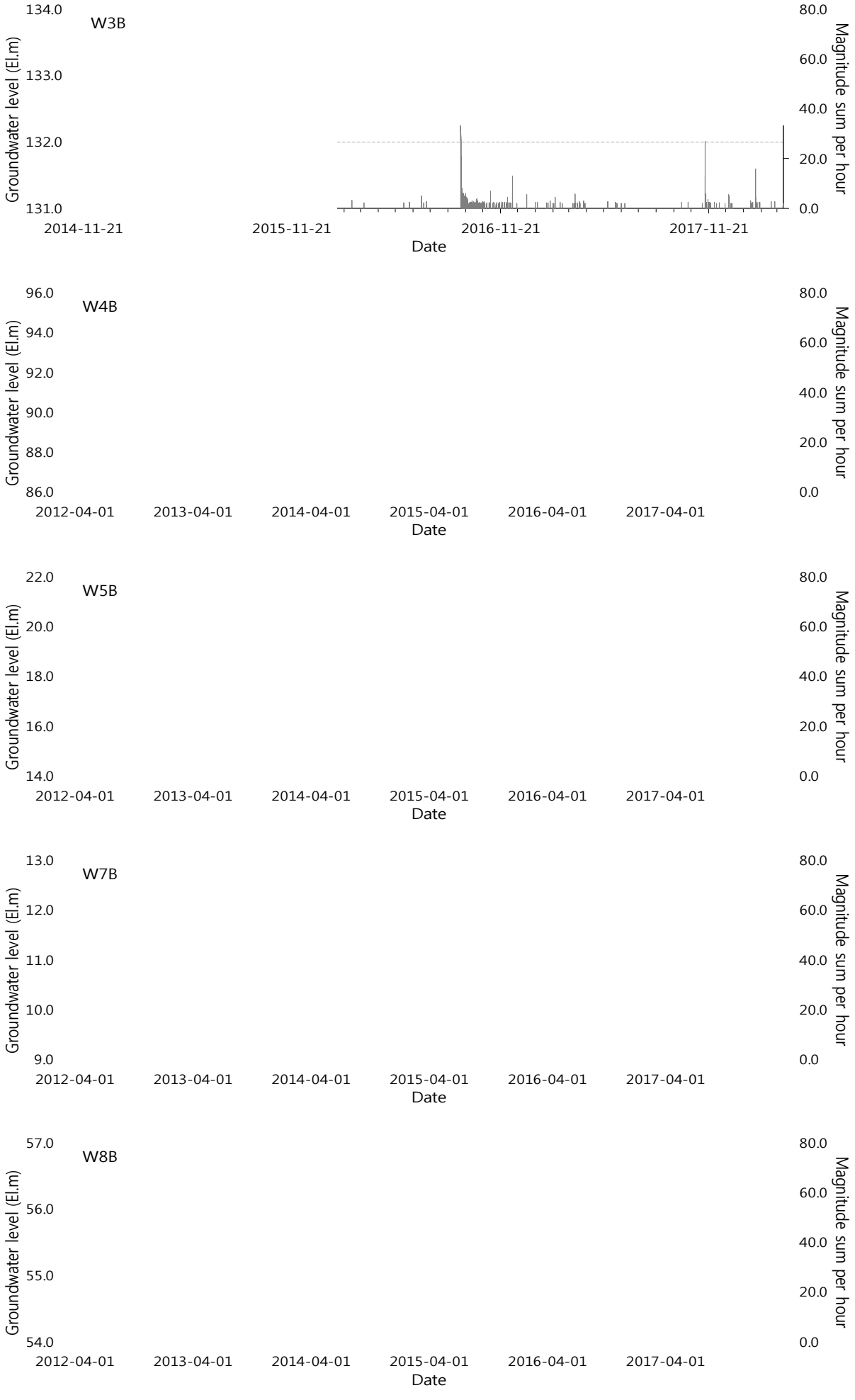
12개소의 지하수 관측정은 개별 지진 이벤트의 진원지로부터 약 14~50 km의 거리에 위치하고 있으며, 시계열 도표에서 보듯이 W1B, W5B, W8B를 제외하고 모든 관측정에서 지진의 영향이 나타나는 것처럼 보인다. 지하수위 상승의 주 요인은 강우에 의하여 발생되는데, 지진 이후에 W1B, W6B, W11B를 제외하고 모든 관측정에서 유사한 또는 작은 규모의 강우가 발생하였을 경우 지하수위 상승량이 이전보다 큰 것으로 보이는데, W6B 및 W11B의 경우에는 강우시에도 지하수위 상승 반응이 매우 약한 관측정으로서 전후에 큰 차이가 없는 것으로 나타난다.

이와 같이 경주지진의 경우 지진 발생 일자에 강우가 존재하였음에도 지하수위의 상승량은 일반적인 상승보다 높은 값을 보이고 있다. 지진에 의한 지하수위 변동 여부에 대한 평가는 이후 절에서 추가 분석되었다.

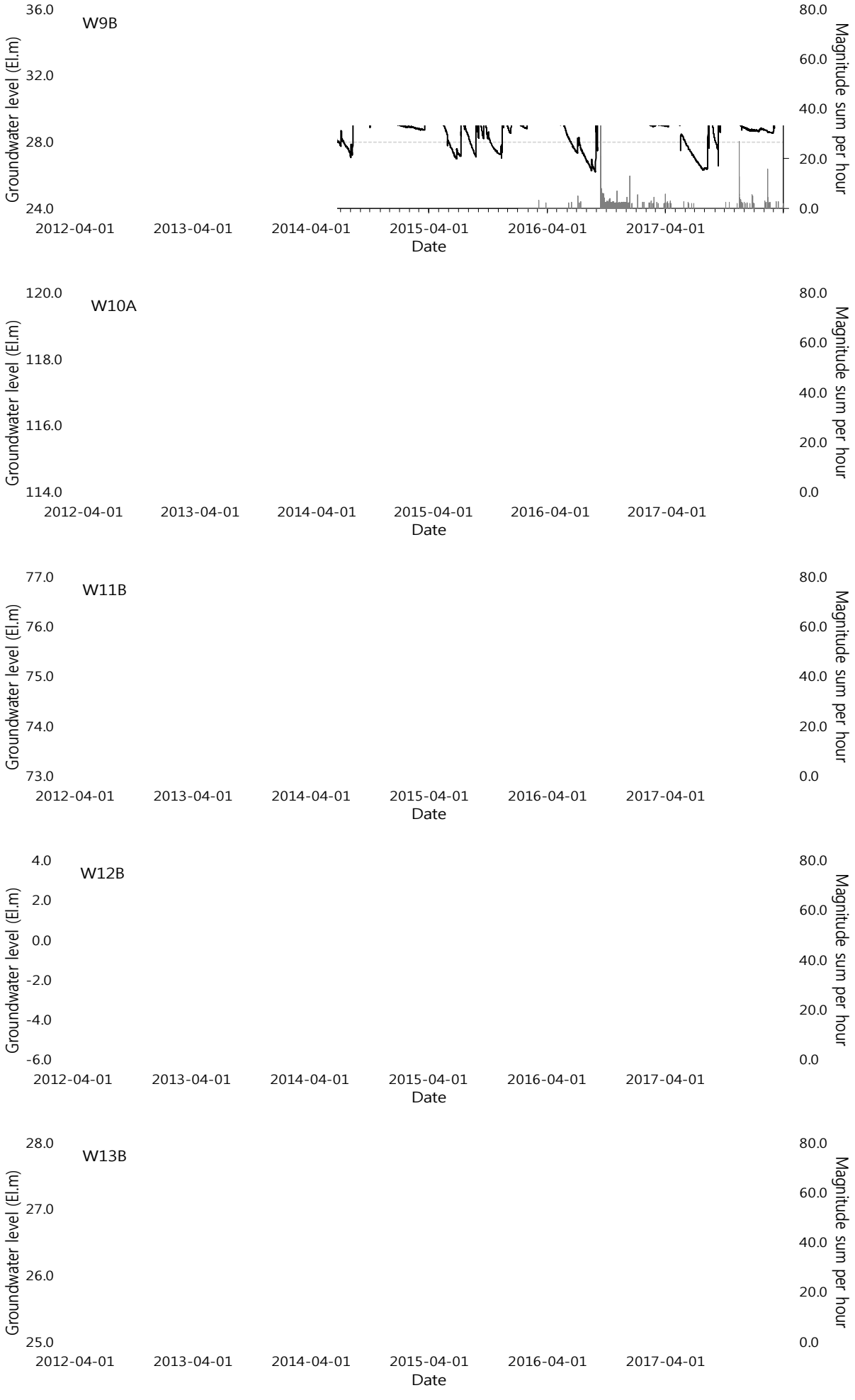
지진이 발생하기 이전에 지하수위 급감(a 유형)이 나타난 것으로 보이는 관측정은 W6B, W9B 및 W11B로 파악되나 지진에 의한 영향인지는 불명확해 보이며, 지진 발생 이후에 응력의 해소 과정에서 지하수의 배출로 인하여 지하수위가 평년의 기저수위 아래로 강하한 경우(b 유형)는 W7B, W11B, W12B, W13B로 파악되었다. 또한, 완만한 하강 패턴(Ⅱ 유형)는 상승된 지하수위가 장기간 동안 유지되어 원래 상태로 복귀되지 않는 경우로서 지반의 응력 변화에 의하여 형성된 압축력이 대수층내 공극압의 변화를 야기시켜 지하수를 상승시킨 후 복원이 빠르게 이루어지지 않은 경우이다. 이와 같이 지진은 주변 암석에 영구적 팽창이나 수축을 발생시키기 때문에 지하수위가 진앙 인근에서 변화되는 것으로 알려져 있으며, 지하수위 변화를 야기하는 기작으로는 공극에서 탈출한 gas가 유체압을 증가시키고, 지진에 의하여 균열의 이완이 투수성 변화를 발생시키며, 액상화와 같은 상부 충적층의 압축 현상이 발생하는 것들이 원인으로 알려져 있다(Wang and Manga, 2014).



[그림 3.4.1] 관측소별 지하수위 변화



[그림 3.4.1] 관측소별 지하수위 변화(계속)



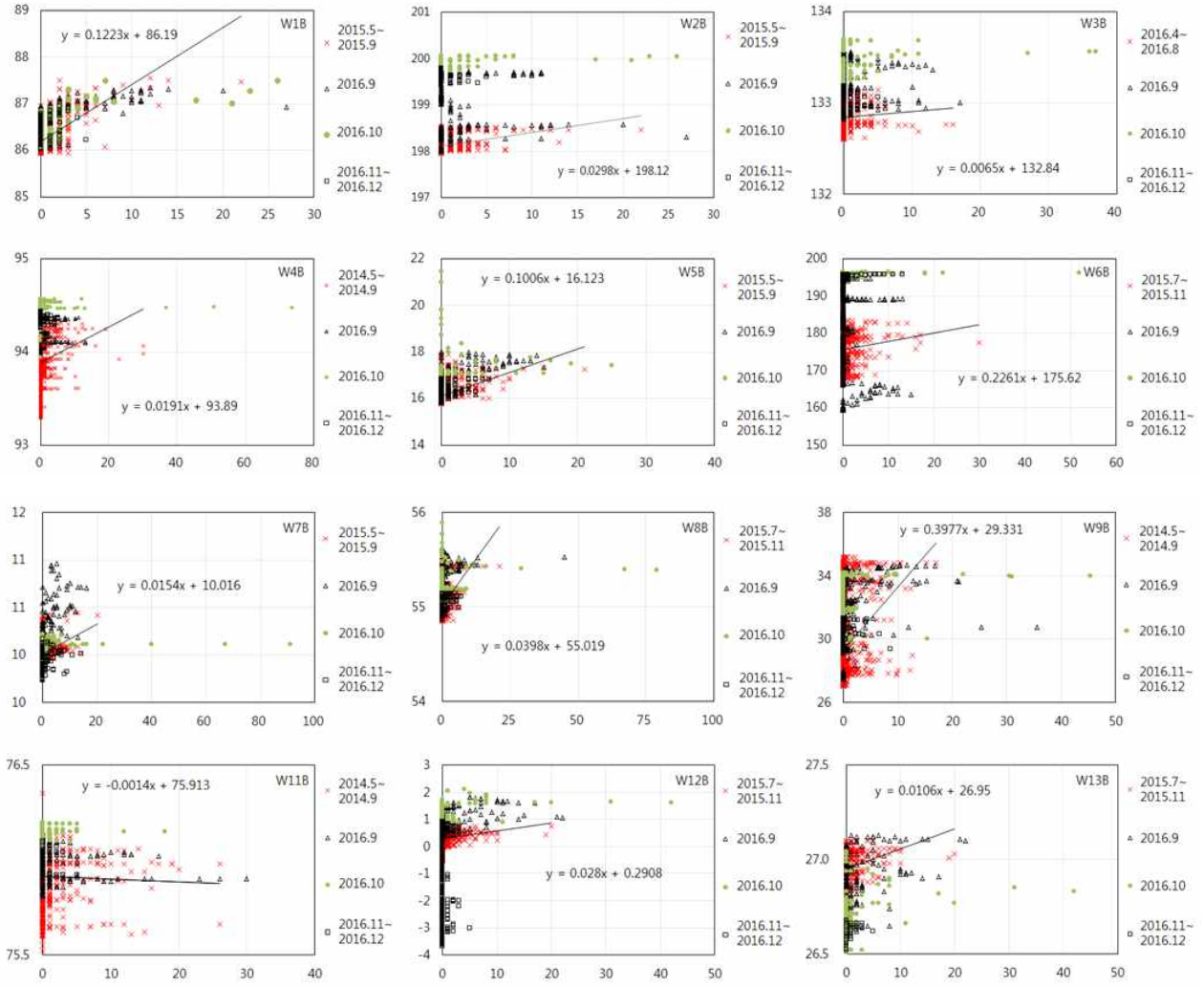
[그림 3.4.1] 관측소별 지하수위 변화(계속)

각 관측정별로 지진이 발생하지 않은 기간(2014년 또는 2015년)의 강우와 지하수위 반응에 대한 산점도와 지진 발생 이후 9월, 10월 및 11월~12월 등 3 구간에 대한 두 인자간의 산점도를 중첩해서 작성하여 지진 이후 수 개월간의 지하수위의 장기 변동성을 분석하였다(그림 3.4.2). 각 산점도는 강우에 대한 지하수위의 교차상관분석을 통한 lag time만큼 지연시켜 작도하였다. 그림에서 지진이 발생하지 않은 기간 동안의 두 인자간의 상관 추정식은 평상시의 강우에 의하여 상승하는 지하수위 반응을 설명하고 있는데, 지진 발생 이후 기간에 있어서 이 추정 식으로 부터 이격된 정도는 강우 요인이 아닌 비정상적인 상승(또는 하강), 즉 지진에 의한 상승(하강)의 정도를 나타내는 것이다. 이와 같이 각 관측정별로 강우, 지진 및 지하수위의 관계를 토대로 수위 변동 특성을 정리해 볼 수 있다.

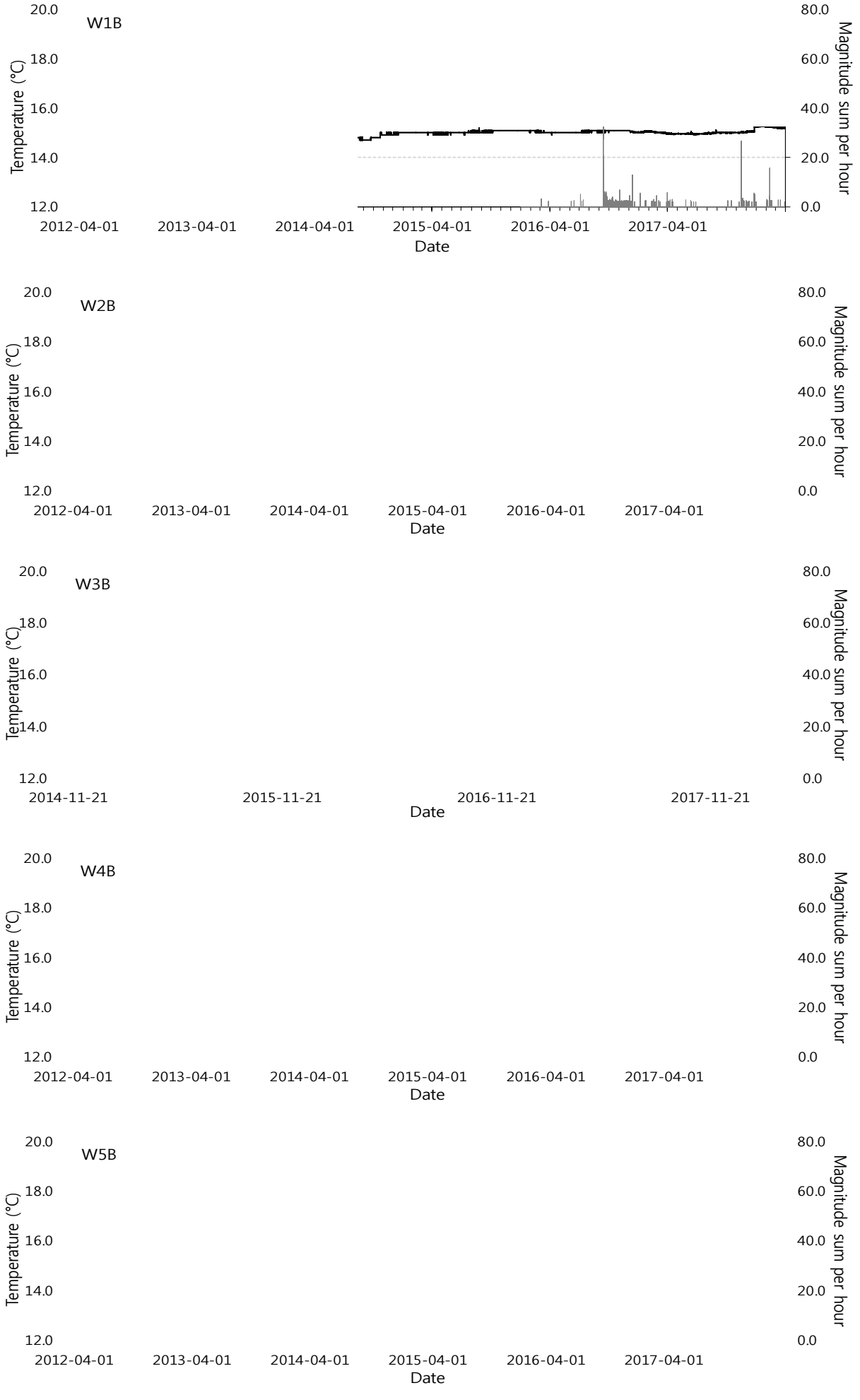
W1B는 지진에 의한 영향이 뚜렷하지 않아 상관 추정식 부근에 도시되고 있으나 일부 시간당 15 mm 이상의 큰 강우 시에 지하수위가 평년에 비하여 낮은 경우가 일부 나타나고 있어 지진 영향의 가능성을 배제할 순 없는 상태이다. W2B는 지진시 지하수위 급상승이 나타나고 이후 지속적으로 고수위가 유지되는 경향을 보이며 추가적인 지진에 의하여 계단상으로 지하수위가 재상승하는 특성이 나타난다. 지진 규모가 가장 큰 9월보다 10월의 지하수위가 더 높은 특징이 나타난다. 이는 반복적인 지진에 의한 누적된 응력이 지하수위의 계단상 상승을 야기 또는 지하수위를 낮추는 응력 해소가 지연 늦어지기 때문으로 보인다. W3B도 W2B와 유사하게 준 계단상의 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 높아 누적된 응력의 영향을 받는 것으로 보인다.

W5B는 W1B와 같이 강우에 의한 지하수위 상승이 나타나나 지진 응력의 누적으로 10월이 9월보다 높은 수위를 유지하고 있다. W6B는 지진 발생 이전에 20 m 이상의 급강하 현상이 나타나 지진에 의한 지하수위 선행 반응인지에 대한 추가 검토가 필요하나 평상시에도 변동 폭이 10 m 이상 발생되는 곳으로서 지속적인 관찰이 필요하다. 이 지점은 규모가 큰 초기의 지진에 의하여 지하수위 상승이 대부분 발생되었으며 이후 지속적으로 유지되고 있으며, 10월의 지하수위가 9월 보다 높은 것이 산점도에 잘 나타나고 있다. W7B는 W1B와 같이 peak 형태로 상승하여 강우에 의한 상승효과가 나타나는 것으로 보이나 산점도에서 보듯이 하강 시점에서는 2015년과 달리 기저 지하수위보다 낮아지고 있어 응력이 해소되는 과정에 의한 지하수위 강하가 나타난다. W8B는 강우에 의하여 상승된 꼭지점 모양이 2015년과 달리 더욱 뾰족한 것으로 나타나고 있어 지진의 영향을 추가적으로 받은 것으로 보이며 상승된 기저 지하수위의 하강이 느리게 나타나는 특성이 있다. W9B는 2016년 8월과 달리 9월에 들어오면서 강우에 의하여 상승된 지하수위가 지수 함수적으로 감소하되 기저 지하수위에 도달하지 못하는 특성을 보이며 낮아진 지하수위가 장기간 지속되는 특성을 보인다. 본 지점은 예년에도 강우에 의한 급상승이 일부 나타나고 있고 기저 수위 아래로의 강하가 존재하는 등 지진과의 연관성에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다. W11B는 W6B와 유사하게 8월에 지하수위 하강이 나타나나 평년에도 상승 하강이 완만하게 나타나는 지역으로서 추가적인 연구가 필요하다. 본 지점은 강우에 의한 지하수위 변동이 뚜렷하지 않으나 9월 지진 이후에 완만한 상승을 보이고 있어 누적된 응력이 작용하는 것으로 보인다. W12B는 강우에 의한 지하수위 상승이 급격히 발생하고 이후 지수함수적으로 하강하여 기저 지하수위

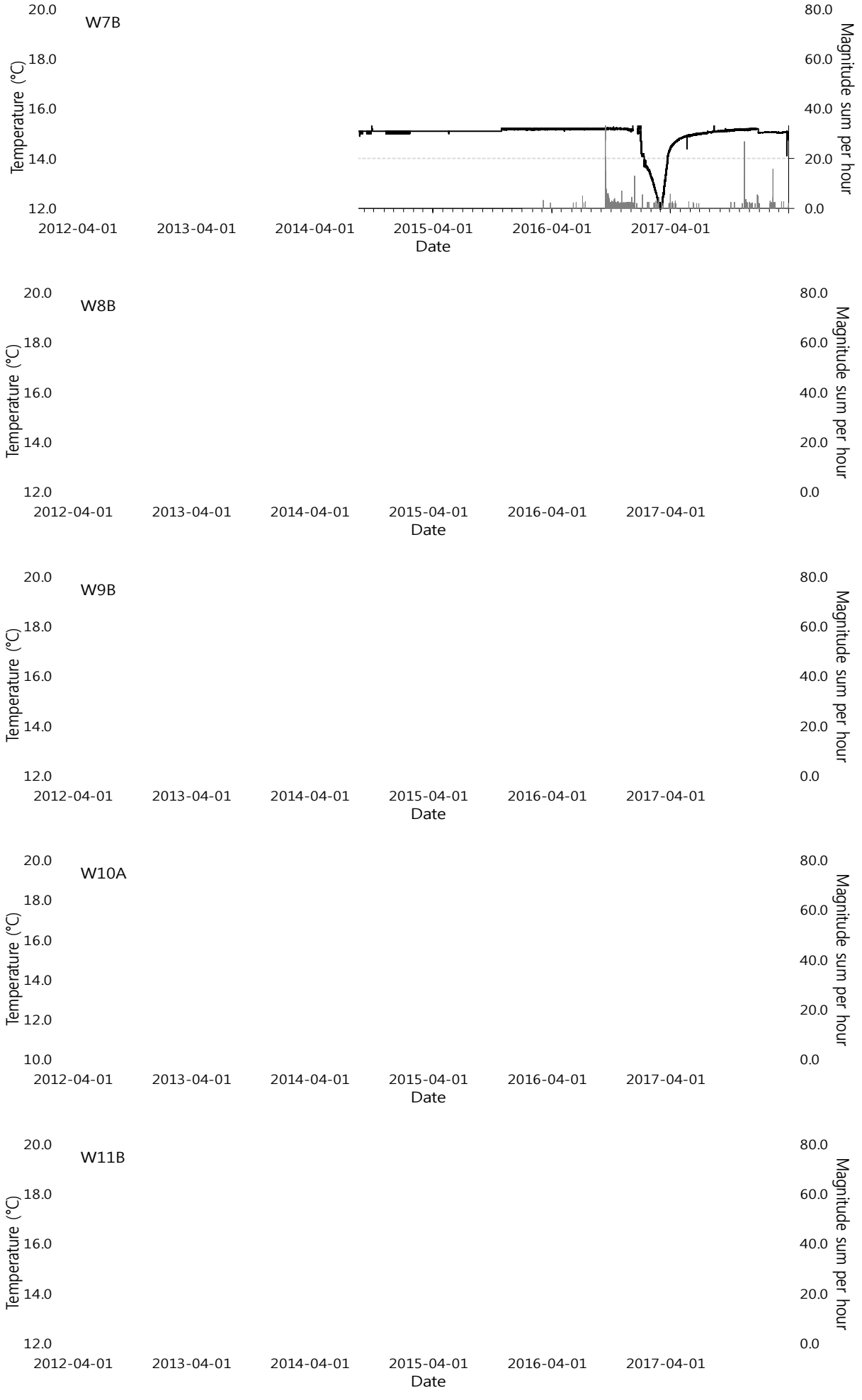
에 도달하지 못한 채로 장기간 유지되나 12월이 지나면서 급격한 하강을 보이는 특성을 나타낸다. 12월의 급격한 하강은 일정 기간 동안 유지되었던 지진 응력이 일시에 해소되면서 지하수위의 급강하를 야기하는 것으로 보인다. W13B는 9월의 지진 발생 이후에는 순간적인 지하수위 강하가 나타났다. 또한, 2015년에는 강우에 의한 지하수위 변화가 뚜렷하지 않고 지하수위도 하반기로 오면서 약간의 상승을 보이는 반면에 2016년 지진 이후에는 급격한 감소 이후에 낮게 유지되는 특성을 보인다.



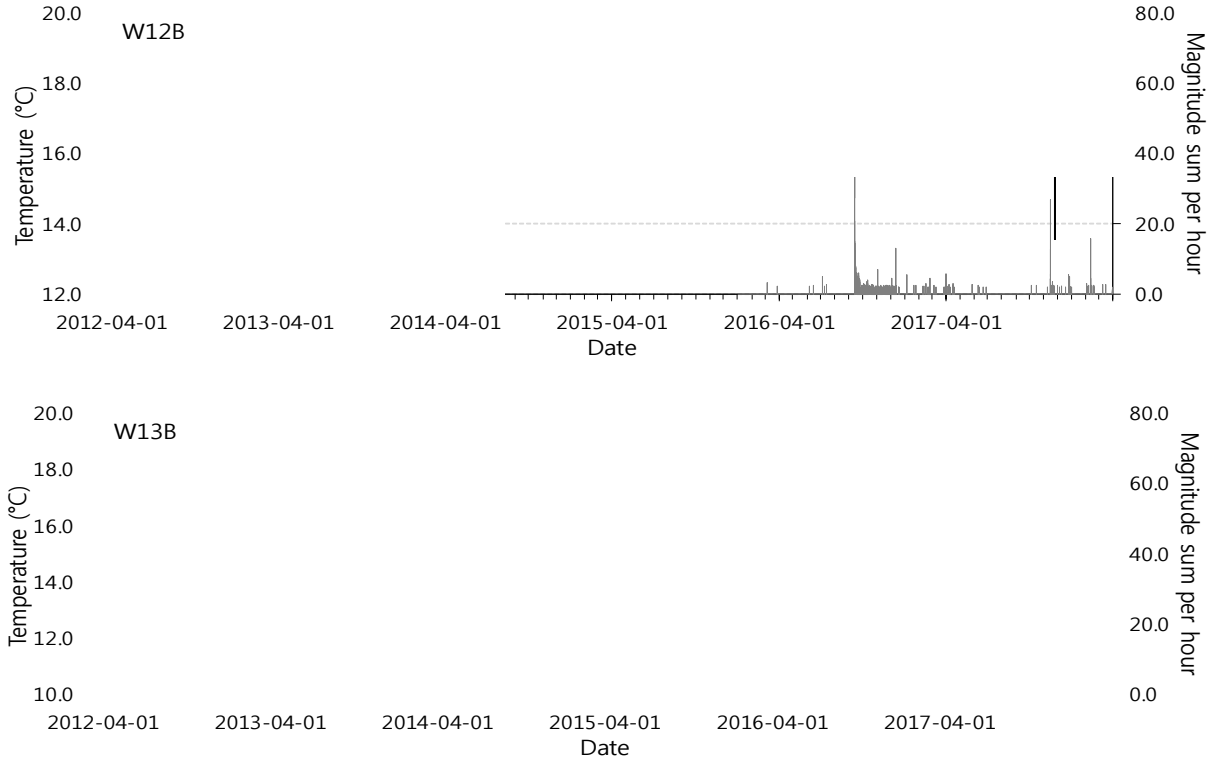
[그림 3.4.2] 강우(x 축: mm)와 지하수위 (y 축: El.m)의 산점도



[그림 3.4.3] 관측소별 수온 변화

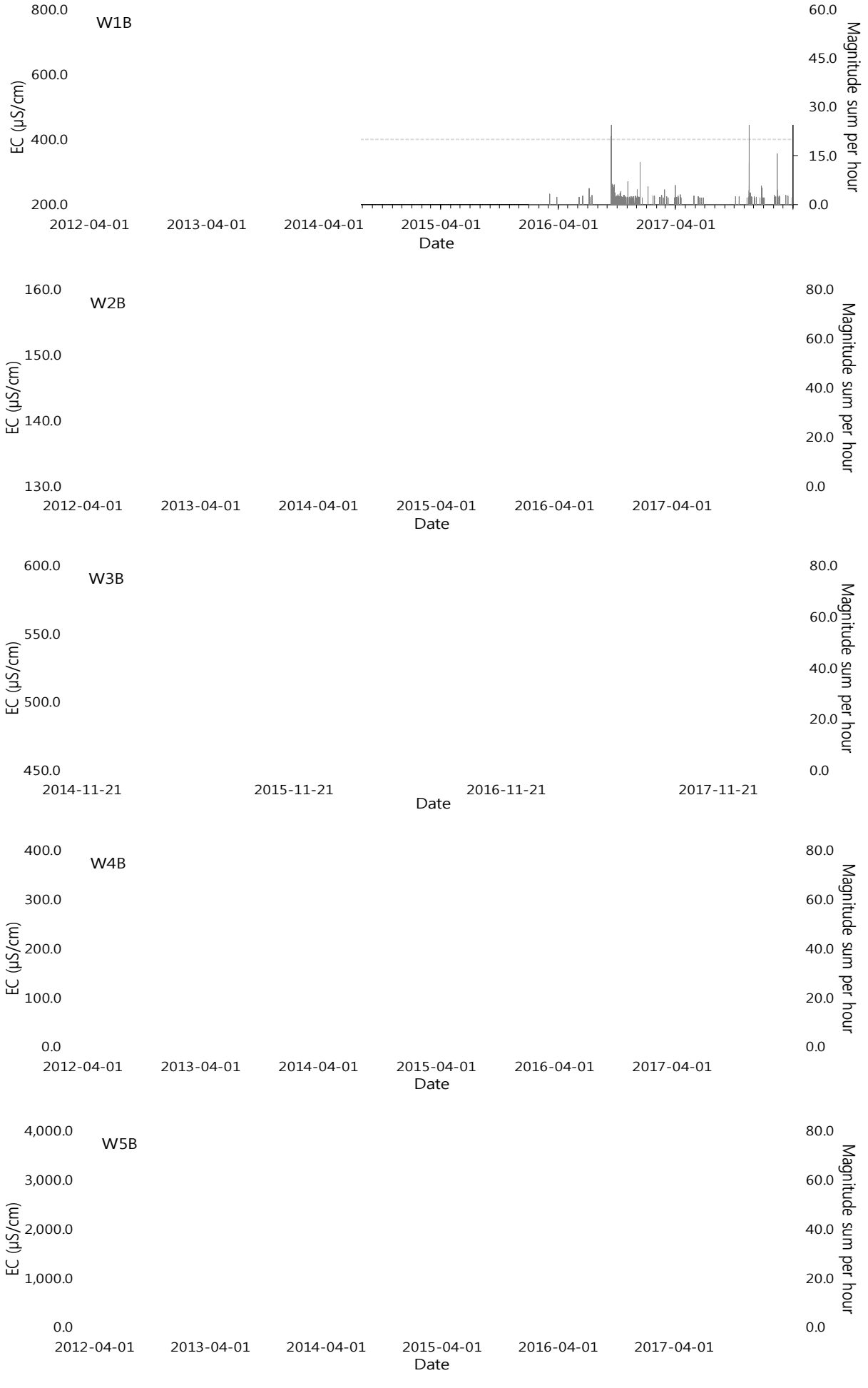


[그림 3.4.3] 관측소별 수온 변화(계속)

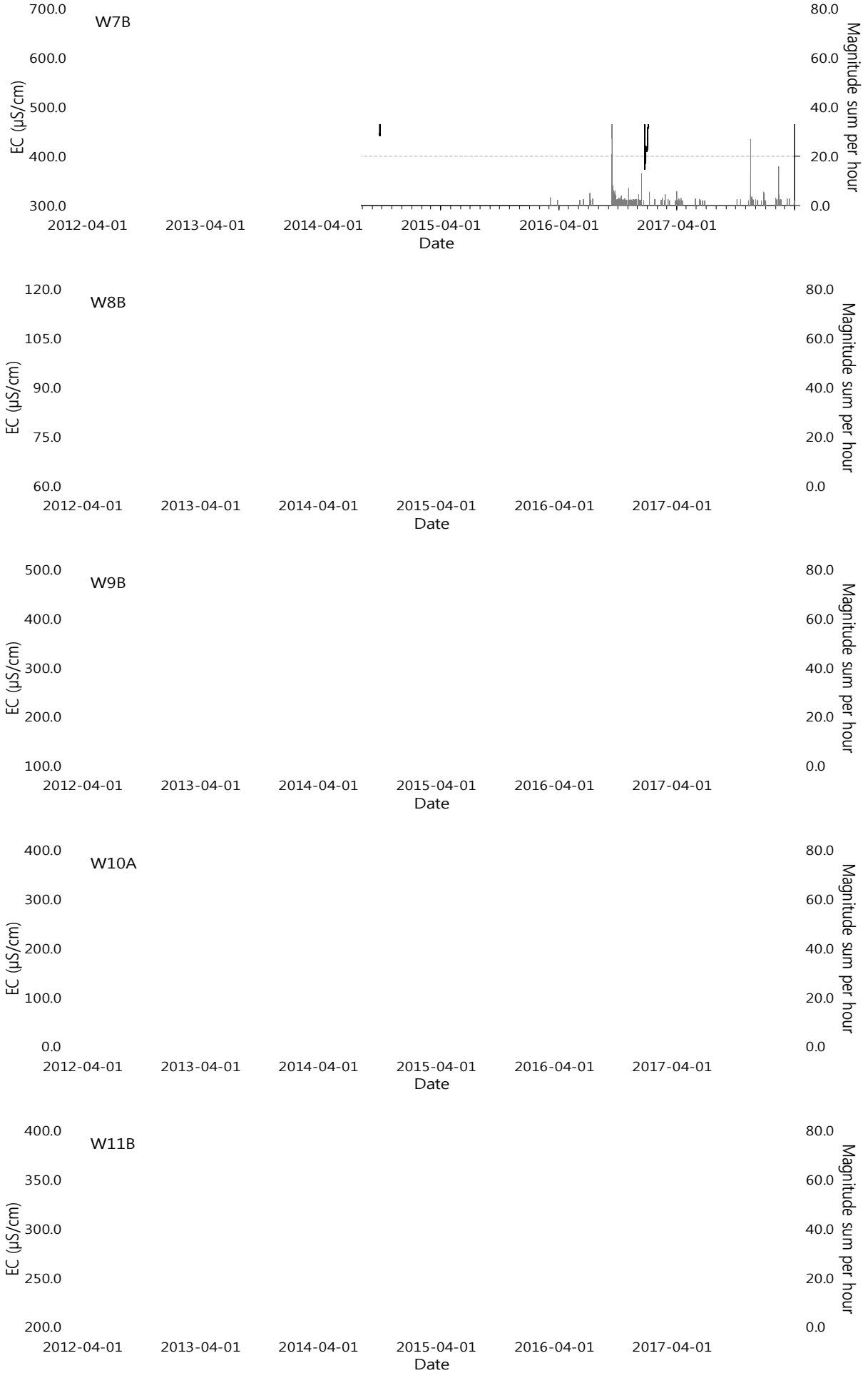


[그림 3.4.3] 관측소별 수온 변화(계속)

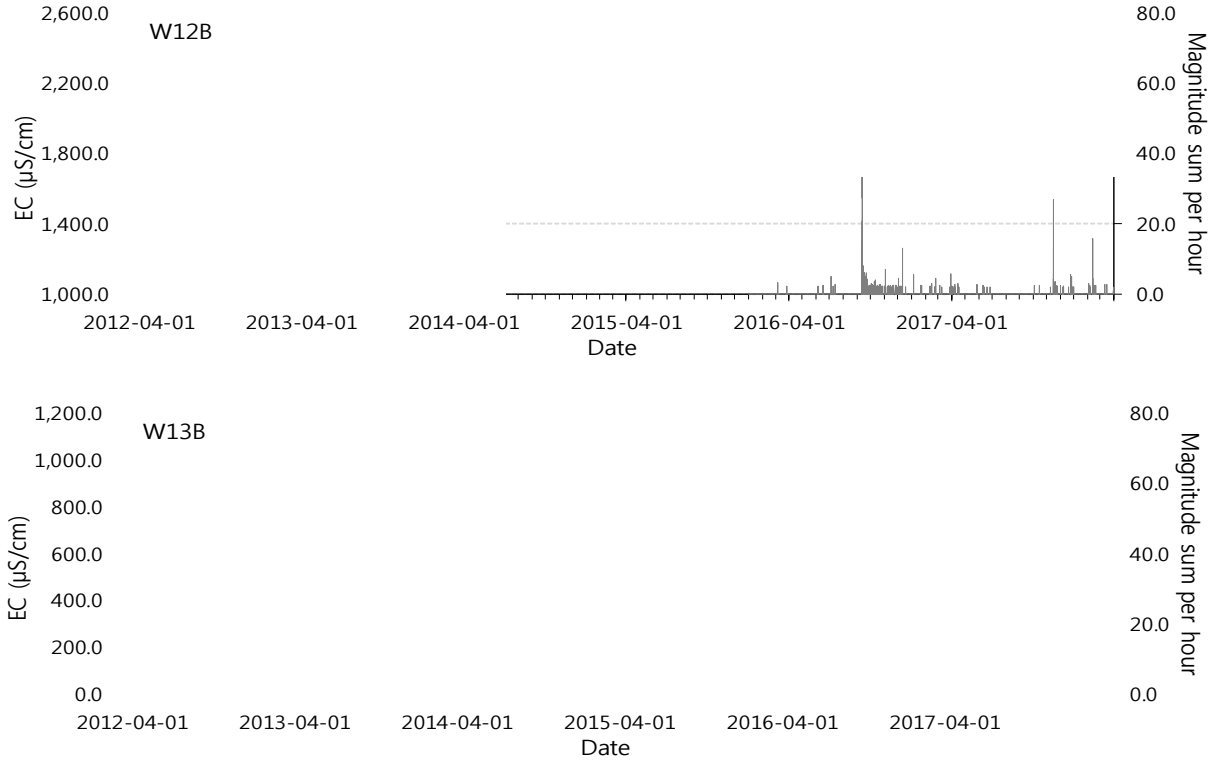
지하수 수온과 전기전도도의 경우에는, 지진 전후 및 지진시 뚜렷한 변화 특성을 보이진 않고 있다. 기존 연구에 의하면, 지진발생시 수온 및 전기전도도 등의 일시적인 변화가 발생할 수 있는 것으로 연구된 바 있으나, 본 관측 자료에서는 이와 같은 현상이 나타나지 않고 있다. 이는 연구에 활용된 국가 지하수 관측망에서의 관측정의 심도가 약 60~70 m 정도로 얕고, 계측센서가 수십 m 이내의 얕은 지점에 위치하기 때문으로 보인다. 수 십 km 하부 지진이 깊은 심도에서 발생하였을 경우에 지진으로 인한 일시적인 파쇄대 지하수의 이동 등으로 인한 수온 및 전기전도도의 변화가 깊은 심도에서는 상대적으로 인지가 용이할 수 있으나, 본 관측정과 같이 얕은 우물의 경우에는 변화의 감지가 용이하지 않은 것으로 보인다. 그러나, 전기전도도에 있어서 W5B, W7B, W9B, W10A, W13B 지점은 경주 지진시 이상 변동을 보이고 있어 지진에 의한 영향인지에 대한 향후 추가 연구가 필요해 보인다.



[그림 3.4.4] 관측소별 전기전도도 변화



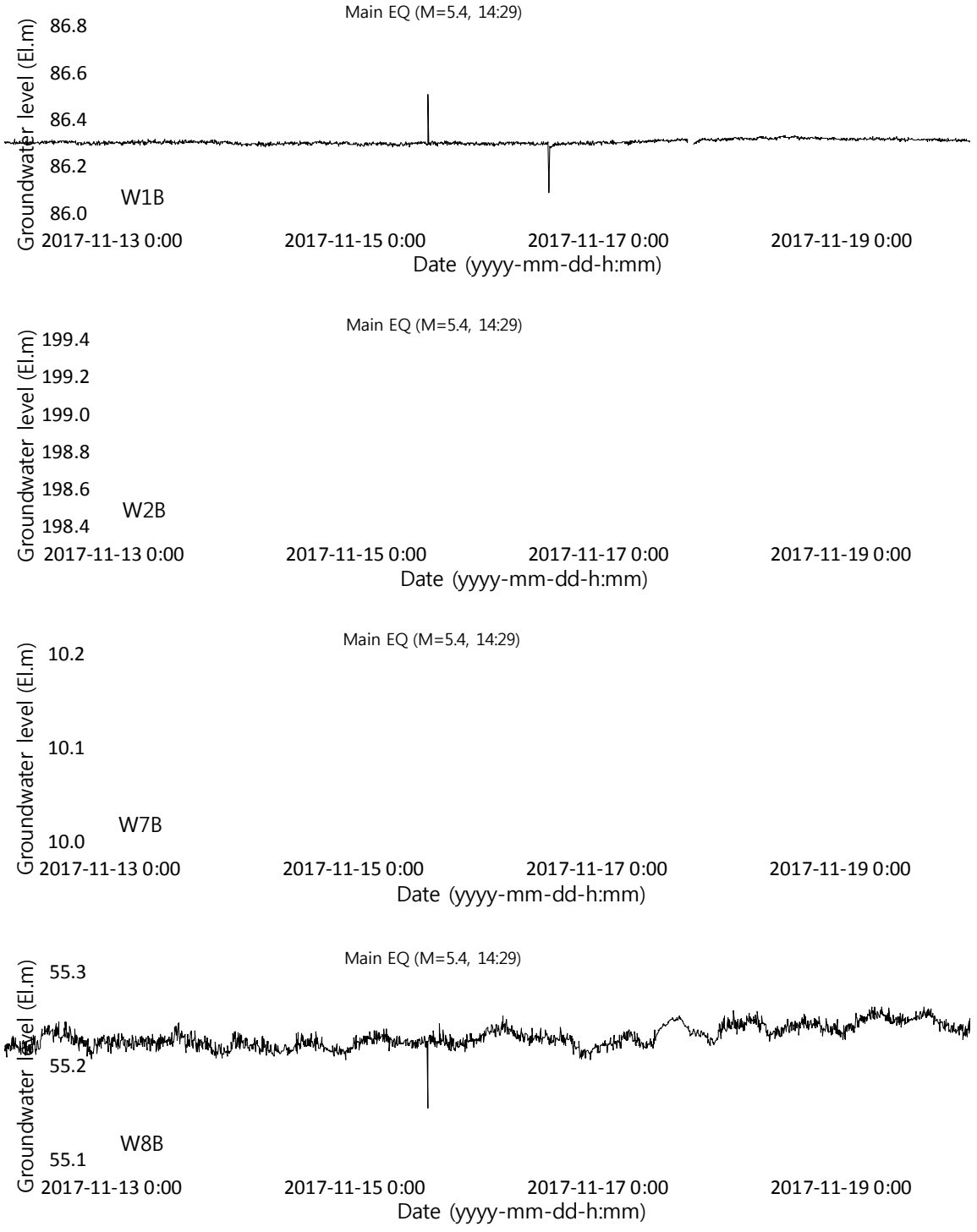
[그림 3.4.4] 관측소별 전기전도도 변화(계속)



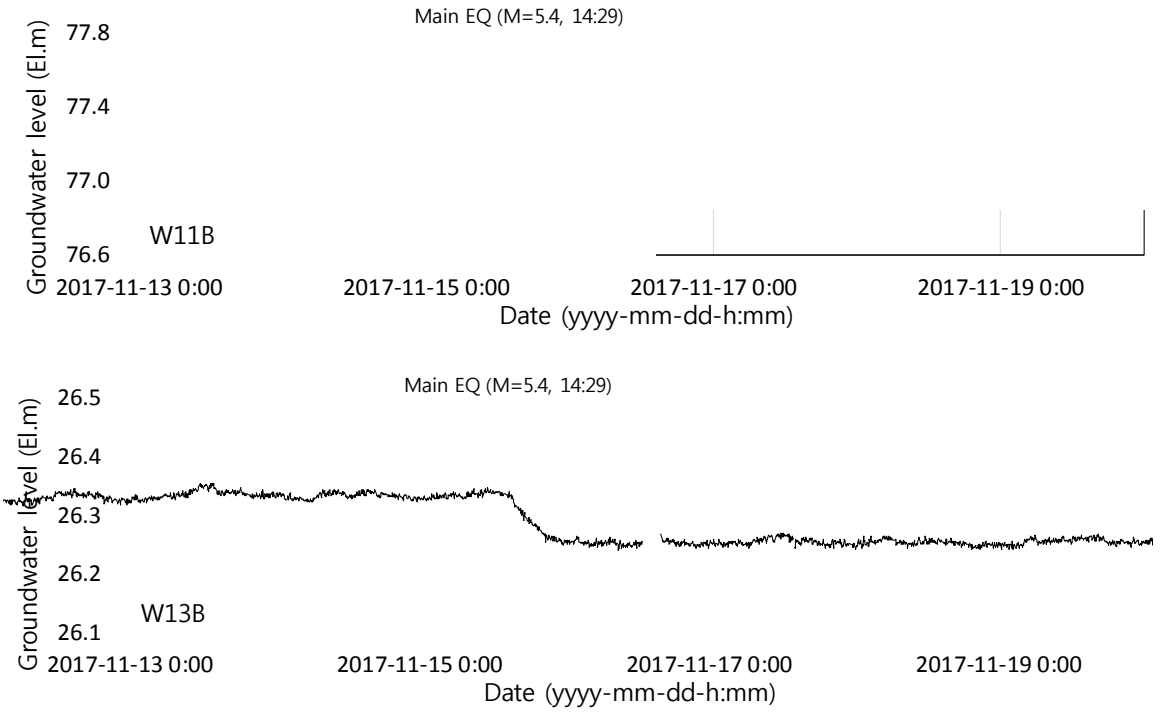
[그림 3.4.4] 관측소별 전기전도도 변화(계속)

○ 5분 간격 관측자료의 지하수 변화

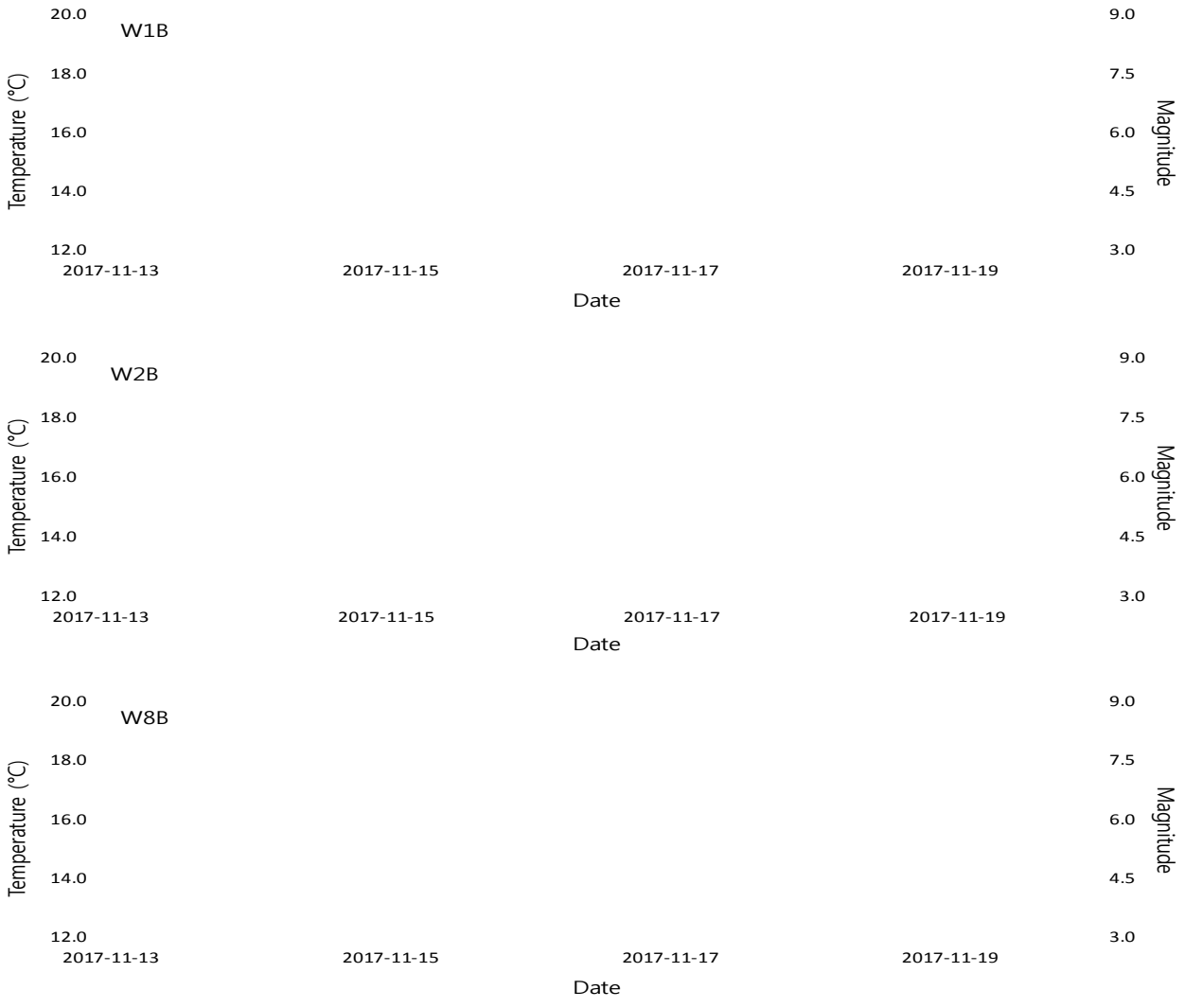
경주, 포항, 울산지역의 일부 지하수 관측정내에 Diver를 설치하여 5분 간격으로 지하수위를 모니터링 하였다(그림 3.4.5). 모니터링 결과 포항본진(M=5.4) 발생시 W1B, W2B, W8B, W11B 관측소에서 순간적으로 응력이 작용하여 순간적인 변화가 관측되었고 W11B, W13B 관측소에서는 지진이후 지하수위가 감소한 후 지속되는 현상이 관측되었다. 이는 지진 발생 후 지하 매질의 변화가 있는 것으로 추정된다. 5분 간격의 자료는 1시간 간격의 자료와 달리, 지진 직전후의 지하수위 변화를 보다 용이하게 파악할 수 있음을 보여주었는데, 이에 대한 세부적인 분석은 추후 절에서 수행하였다.



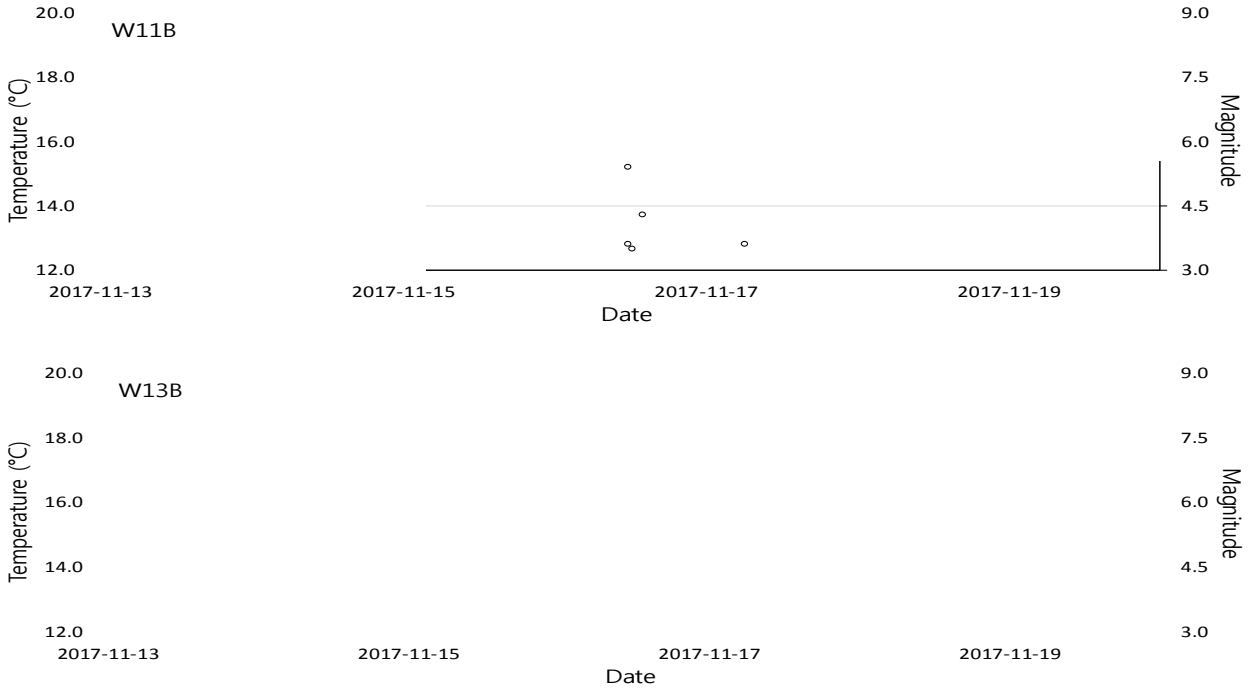
[그림 3.4.5] 포항 지진 발생시 5분 간격 지하수위의 시계열 변화



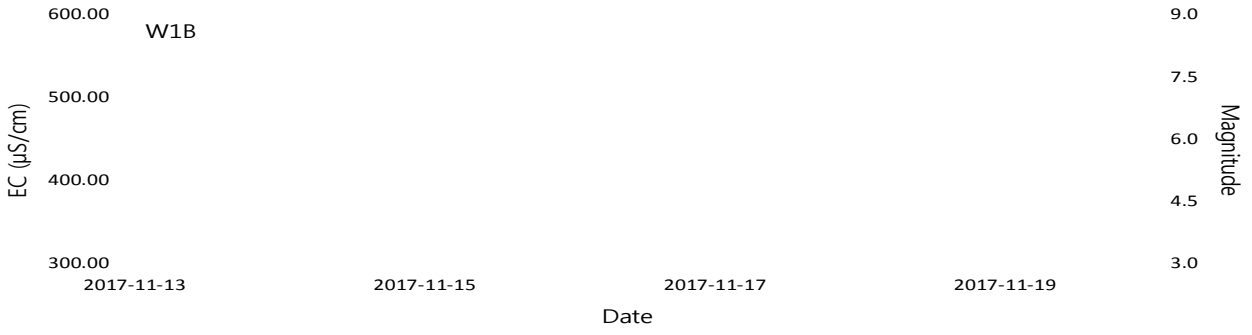
[그림 3.4.5] 포항 지진 발생시 5분 간격 지하수위의 시계열 변화(계속)

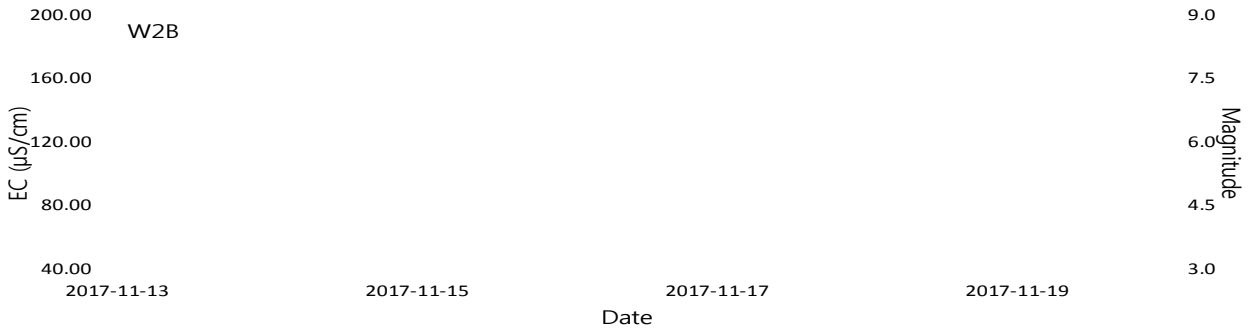


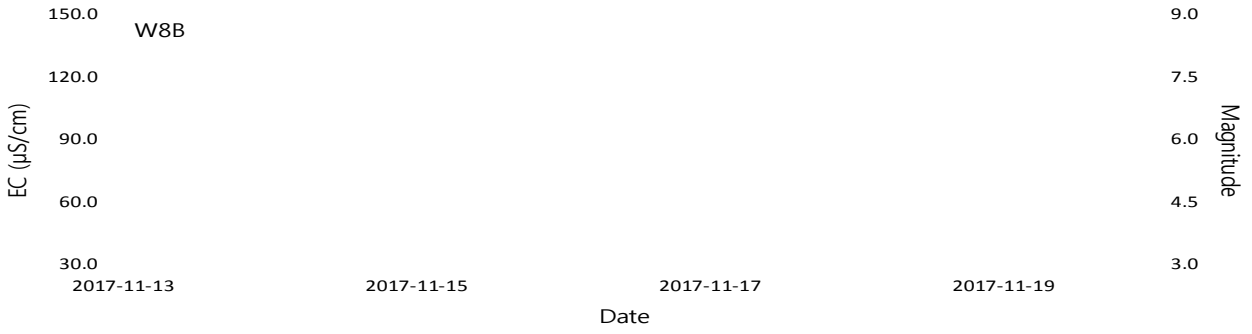
[그림 3.4.6] 포항 지진 발생시 5분 간격 온도의 시계열 변화



[그림 3.4.6] 포항 지진 발생시 5분 간격 온도의 시계열 변화(계속)







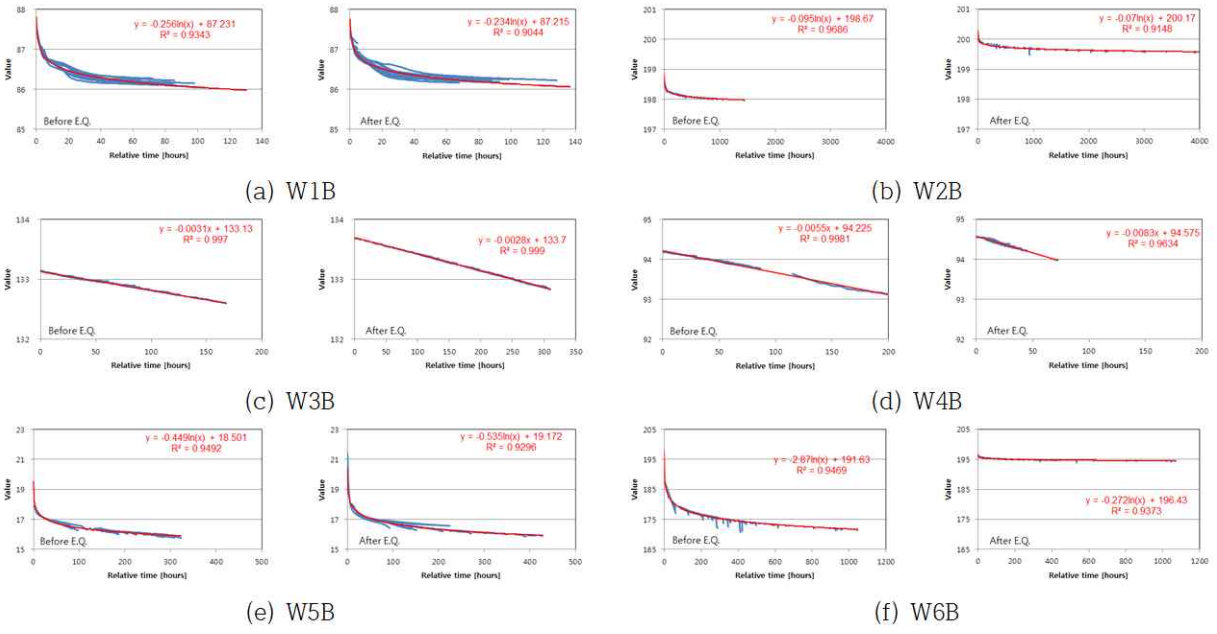
[그림 3.4.7] 포항 지진 발생시 5분 간격 전기전도도의 시계열 변화

5. 감쇠곡선에 의한 지진 영향 분석

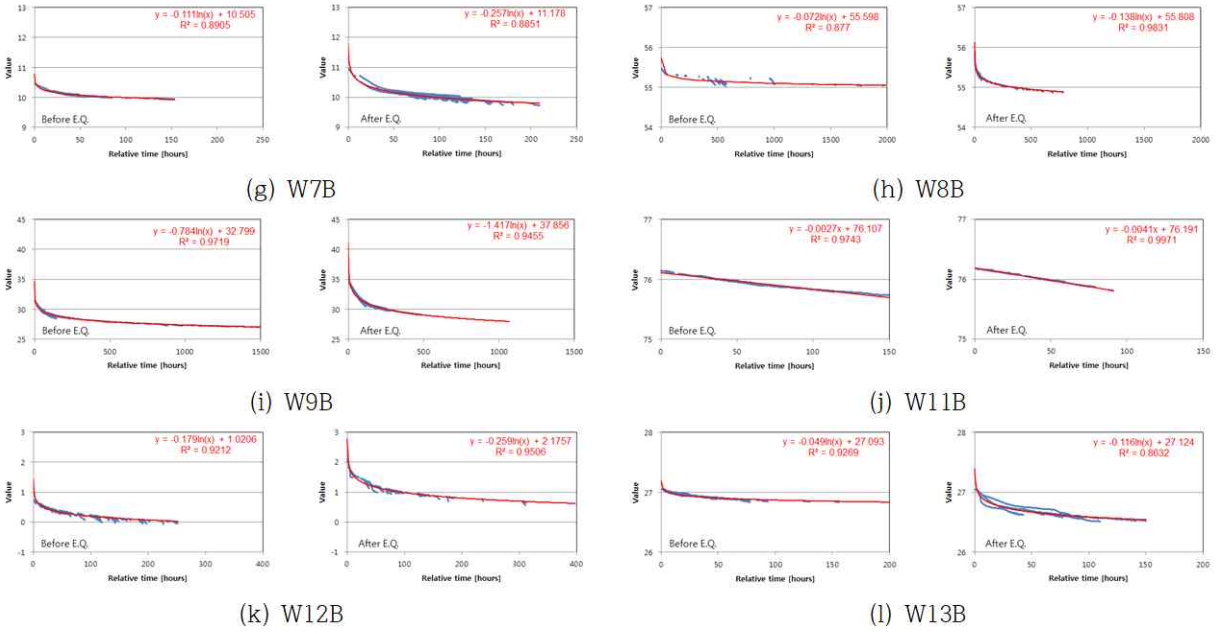
경주 지진의 실제 관측 자료(1시간 간격)를 토대로 지진 이전과 이후의 지하수위 감쇠 곡선을 비교해 보았다. 지하수위 감쇠곡선은 강우로 인하여 상승한 지하수위가 하강하면서 형성되는 형태로서 대표 감쇠곡선은 해당 지하수 관측지점의 대수층의 수리적 특성에 기반된 지하수위 변동성을 나타내는 특성에 해당한다. 즉, 일정한 기울기의 형태로 강우 이후에 지하수위가 하강, 배출되는 특성을 설명하는데, 특정 활동 이후에 이 하강, 배출되는 형상이 변화된다는 것은 대수층의 물리적 특성의 변화를 의미한다.

강우 발생으로 상승된 지하수위는 일정한 형태의 감쇠곡선을 보이게 되는데, 경주 지진 발생 기간 동안에는 시계열도에서 보는 바와 같이 지진과 함께 강우가 동반되어 지하수위 상승 현상이 나타나고 있다. 상승 이후의 감쇠곡선의 형태 및 감쇠 방정식의 특성을 이용하여 지진 전 후의 지하수위 하강 형태의 변화 특성을 평가하였다(그림 3.5.1).

연구지역 지하수 관측정의 지하수위 감쇠곡선은 W3B, W4B 및 W11B를 제외하고 지수적으로 감소하는 특성을 갖고 있다. 지진 발생 이전과 이후의 감쇠곡선의 변화를 살펴보면, 대부분이 관측정에서 지진 이후의 감쇠곡선의 시작점이 지진 발생 이전보다 높게 위치하고 있으며, 수위가 안정화되는 끝 부분도 지진 이후가 높은 경향을 보이고 있으나 다만, W13B의 경우에는 지진 직후 수위가 하강하기 때문에 지진 이후의 기간이 더 낮은 값을 보이고 있다. 지진 전후의 지하수위의 감소 경향성을 보면, 선형으로 감소하는 W4B, W11B는 지진 이후 기울기가 급해져서 지진에 의한 상승으로부터 원래 안정된 수위로 회복하려는 경향이 반영. 감쇠곡선 형태의 가장 큰 차이를 보이는 것은 W6B로서 뚜렷한 수위 상승 이후 감소가 거의 없는 특성이 반영된다.



[그림 3.5.1] 경주 지진 전후의 지하수 감쇠곡선



[그림 3.5.1] 경주 지진 전후의 지하수 감쇠곡선(계속)

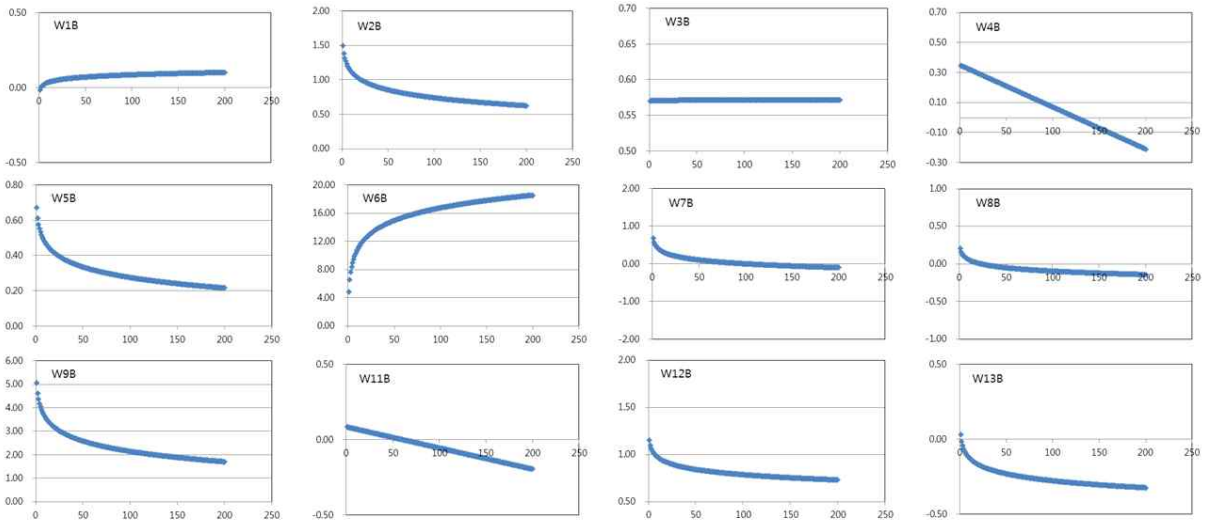
평년의 지하수위 감쇠곡선과 지진 이후의 지하수위 감쇠곡선의 차이는 지진에 의하여 형성되었을 것으로 추정되는 지하수위 상승량을 고려하여 지하수위 반응곡선을 작성하였다(그림 3.5.2). 시간이 경과함에 따라 감소하는 경우와 증가하는 경우로 구분이 된다. 감소하는 경우는 지진 응력이 해소되어 복원되고 있음을 의미하며, 증가하는 경우는 지진 응력이 누적되어 시차를 두고 지하수위 상승효과가 발생함을 의미한다. W1B의 경우는 초기 값이 지진 전후에 거의 동일한 것으로 보아 강우에 의한 유사한 영향을 받았으며, 시간이 지남에 따라 지진 응력 누적이 존재하나 그 영향이 매우 적은 것으로 보인다. W2B, W5B, W7B, W12B는 지진 초기의 강우 영향이 반응곡선에 포함되어 있다고 하더라도 시간 경과 후에도 높은 수위 값을 보이고 있어 지진 영향이 뚜렷하다. W3B는 지진 발생 효과가 초기 지하수위 상승을 유발시켰으며 이후 지속적으로 지진 응력의 효과 유지한다. W6B는 초기 지하수위 상승이 두드러지며 이후에도 지진 영향에 의한 수위 상승이 지속적으로 발생하고 있다. W13B는 나머지 관측정들과는 반대로 초기 수위 상승효과가 거의 없고 시간이 지나면서 즉시 음의 값을 보여 응력 해소에 의한 작용으로 보인다.

각 반응곡선에서 초기($t=0$) 값은 누적된 지진에 의한 지하수위 최대 상승량으로 고려될 수 있다 (실제 강우 요인이 제거되지 않았으므로 지진 영향은 이 보다 큰 값으로 추정됨). W1B, W11B, W13B는 지진에 의한 초기 수위 상승이 거의 없으나, W2B 1.5 m, W3B 0.57 m, W4B 0.35 m, W5B 0.67 m, W6B 4.8 m, W7B 0.67 m, W8B 0.21 m, W12B 1.16 m 등의 상승이 나타난다. W1B는 Coulomb stress의 shadow 영역에 포함되어 응력이 크게 작용하지 않은 지역이며, W11B와 W13B는 상대적으로 원거리에 위치하는 관측정에 해당한다. W2B, W6B는 Coulomb 응력장의 trigger zone에 해당하는 지역으로서 타 지역에 비하여 지하수위가 높게 상승하였다. W9B는 5.06 m의 높은 지하수위 상승이 나타나나 평상시 강우시 높은 수위 상승을 보이는 지역으로서 진앙과 원거리에 위치하는 점을 고려할 때 지진에 의한 영향 여부는 추가적인 검토가 필요하다.

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

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

여기에서, $b \approx \pi^2 \frac{\kappa}{4L^2}$으로서, κ는 수리확산도, L은 대수층의 두께에 해당한다. κ는 수리전도도 k로부터 $\kappa = \frac{k}{S_s}$로 표현된다. 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 큰 감소를 초래하고 장기간 시간이 경과함에도 높은 수위를 유지하게 하는 것으로 보인다. 반면에, shadow zone내에 위치한 지하수 관측정들은 순간적인 수위 상승 이후 응력의 해소에 의한 지수적 수위 강하가 빠르게 발생하는 것으로 보인다.



[그림 3.5.2] 지진에 의한 지하수위의 추정 감쇠곡선 (x: time (hr), y: water levels (El.m)).

6. 주성분 분석을 통한 변화 분석

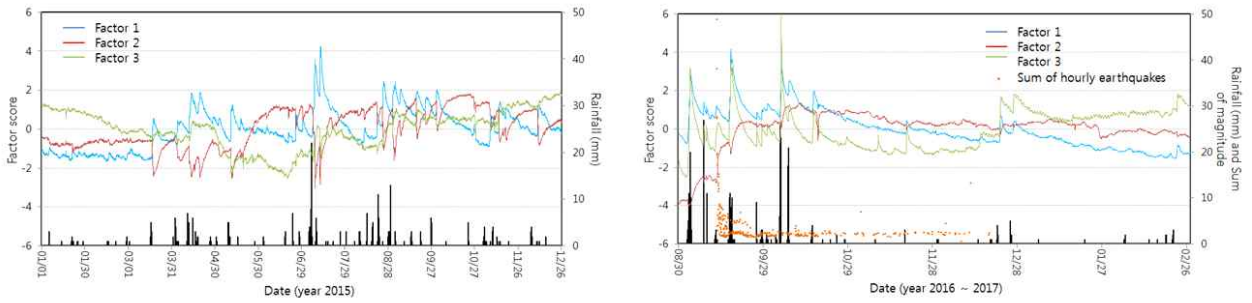
경주 지진시 12개 관측정의 지하수위 자료를 대상으로 지진 발생 이전과 이후의 시계열의 특성과 공간적 분포를 파악하기 위하여 주성분 분석을 실시하였다. 주성분 분석은 변수들의 상관행렬 또는 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 이용한 스펙트럴 분해를 이용하여 주성분이라는 새로운 변수를 생성하는 방법이다. 주성분 분석 결과, 지진 이전(2015년) 및 이후(2016년 9월~2017년 2월) 모두 3개의 주성분으로 전체 자료의 약 77% 및 87%를 설명할 수 있는 것으로 나타났다(표 3.6.1).

[표 3.6.1] 주성분 분석 결과

Component	Extraction sums of squared loadings					
	Before earthquakes (2015)			After earthquakes (after Sep. 2016)		
	Total	% of variance	cumulative %	Total	% of variance	cumulative %
1	4.958	41.316	41.316	6.217	51.807	51.807
2	2.510	20.916	62.231	3.159	26.321	78.128
3	1.795	14.957	77.189	1.062	8.850	86.978

지진 발생 이전의 주성분 시계열도를 보면, 주성분 1은 강우에 의한 급격한 지하수위 상승 및 하강의 특성을 반영하는 요소이며, 주성분 2는 강우에 반대로 작용하는 요소에 해당. 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 이전에는 없던 새로운 주성분이 발생한다(그림 3.6.1).

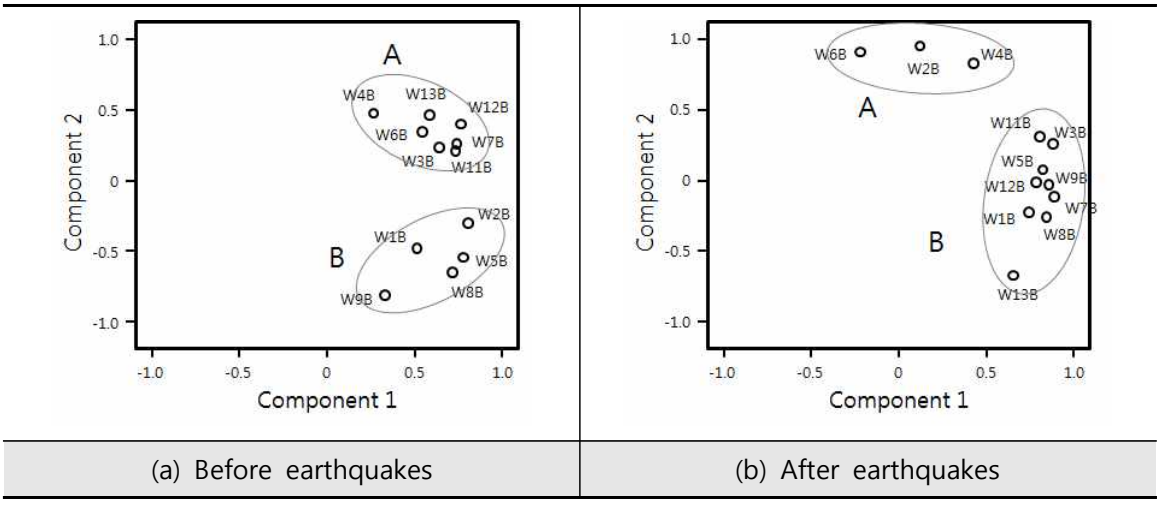
지진 발생 이후에 나타난 주성분 2를 보면, 9월 12일 지진 다발 기간에 지하수위의 상승을 잘 보여주며, 연속되는 지진에 의하여 10월초까지 지하수위 상승을 이끌고 있으며, 이후에는 완만한 하강을 보이는 성분으로서 지진에 의한 지하수위 상승 후 원상 복구에 장기간이 소요되는 요인이 존재함을 보여준다.



(a) Before earthquakes (b) After earthquakes

[그림 3.6.1] 지진 발생 전후의 주성분 시계열도

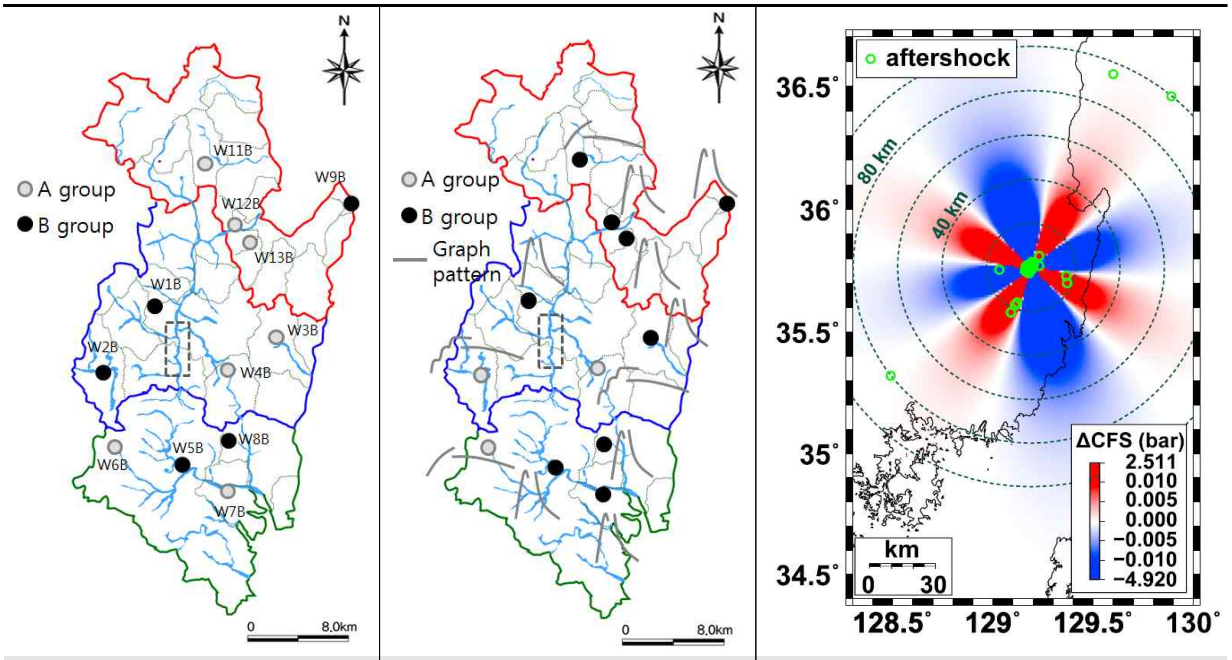
3개의 주성분 중에서 서로 독립적이면서 대표적인 주성분 1과 주성분 2를 도표의 축으로 활용하여 각 관측정의 소속 범위를 도식화하였다(그림 3.6.2). 지진 발생 이전의 A 그룹에는 W3B, W4B, W6B, W7B, W11B, W12B, W13B가 해당되며, B 그룹에는 W1B, W2B, W5B, W8B, W9B 등이 해당되는 반면에 지진 발생 이후의 A 그룹에는 W2B, W4B, W6B가 해당되며, B 그룹에는 W1B, W3B, W5B, W7B, W8B, W9B, W11B, W12B, W13B가 해당된다. 지진 발생 이후의 A 그룹은 주성분 2의 효과가 뚜렷한 그룹으로서 지진에 의한 지하수위 상승 후 하강이 매우 완만하게 나타나는 특성이 보인다.



(a) Before earthquakes | (b) After earthquakes

[그림 3.6.2] 주성분 1과 2의 지하수위 시계열도 그룹별 분류

지진 전과 후의 각 관측정의 소속 그룹의 공간적 분포를 파악하기 위하여 지형도에 도시하였다(그림 3.6.3). 경주 지진의 Coulomb stress field의 trigger zone에 도시된 관측정은 W2B, W4B, W6B의 A 그룹으로서 진앙에 비교적 가까우며 지하수위 상승이 현저하고 장기간 지속되는 것으로 나타난다. A 그룹은 계단형 또는 non-peak형 수위 상승 및 완만한 하강 특성을 보이는 관측정이다.



(a) Before earthquakes | (b) After earthquakes | (c) Spatial distribution of aftershocks over the Coulumb stress (by Hong et al., 2017)

[그림 3.6.3] 각 관측정 소속 그룹의 공간적 분포

7. 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN) 기반의 지하수위 예측 및 평가

경주지진의 전후 시기에는 연속 강우가 발생하였던 기간으로서 지하수위의 변화가 강우에 의한 것인지, 지진에 의한 것인지 명확히 파악하는 것이 용이하지 않다. 지하수위의 변화는 일반적으로 강우, 주변에서의 인위적인 양수, 주입, 하천수위의 변동 등에 의하여 영향을 받게 되는데, 특히 인위적인 요인을 제외한 자연적인 요인에 의한 지하수위 변화는 강우에 의하여 일차적으로 결정되게 된다. 지하수 관측정은 주변에 인위적인 양수 조건이 거의 작용하지 않는 지역에 위치하고 있어 인위적인 영향은 거의 작용하지 않는다고 가정한다면, 강우자료를 활용하여 지하수위를 예측하고 이를 활용하여 지진시의 지하수위 변동을 평가할 수 있을 것이다.

본 연구에서는, 인공신경망을 활용하여 강우 및 이전의 지하수위 자료로부터 현재의 지하수위를 예측하여 이를 활용한 지진시의 변동 특성을 분석하였다.

○ 인공 신경망 이론

지하수위 시계열 데이터에서 지진에 의한 지하수위 변동 요인을 추출하기 위하여 인공신경망(ANN)을 활용한 시계열 예측을 수행하였다. ANN 모델은 1990년대 이후 지표수 및 지하수의 수위 자료 예측을 위하여 활용되고 있으며, 국내의 경우 최근에 국가지하수 관측망의 지하수위 변동 예측을 위하여 적용된 바 있다(Yoon et al., 2013; Yoon et al., 2014). ANN 모델은 입력 layer, 은닉 layer 및 출력 layer로 구성이 되며 각 층은 다수의 노드들로 이루어져 있으며 각 층간의 노드들은 일정한 연결강도로 연결되어 있다(그림 3.7.1). 입력의 각 노드에 입력자료가 들어왔을 때 은닉 layer을 거쳐 출력값이 연산되는 과정은 다음 식과 같이 표현된다(Yoon et al., 2013).

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^{m} w_{ji} x_i + b_j\right)$$

여기에서, x_i는 이전 layer의 i번째 노드값, y_j는 현재 layer의 j번째 노드값, b_j는 현재 layer의 j번째 노드의 편중값, w_{ji}는 x_i와 y_j의 연결 강도, m은 이전 layer의 노드의 갯수를 의미한다. f는 은닉 layer와 출력 layer의 활성함수로서 본 연구에서는 은닉 layer에 대하여 로그-시그모이드(log-sigmoid) 함수와 출력 layer의 전이함수로 선형함수를 이용하였다.

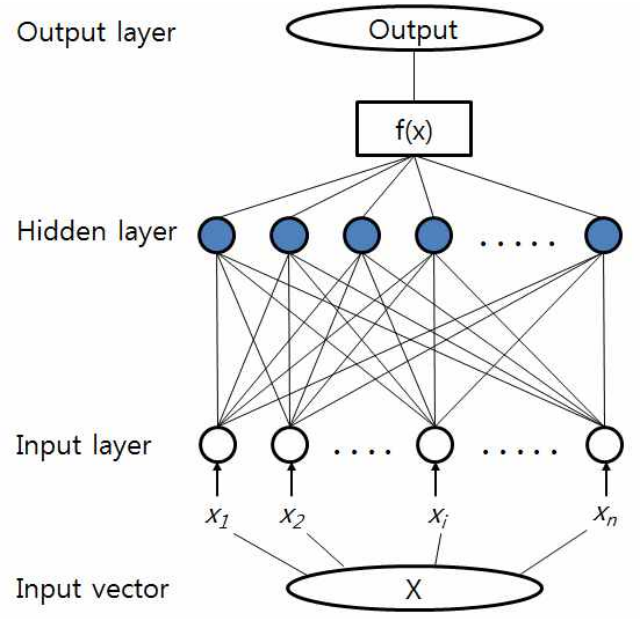
ANN 모델의 학습 방법으로서 역전파 알고리즘(back propagation algorithm)을 이용하였는데, 이는 ANN의 연산과정에서 발생되는 오차를 이용하여 출력 layer에서 입력 layer 방향으로 연결강도 및 편중값을 연속적으로 수정하게 하는 작업을 수행하며 다음 식에 의한다(Rumelhart et al., 1986).

$$E^k = \sum_i (t_i^k - y_i^k)^2$$

$$w^{k+1} - w^k = MM(w^k - w^{k-1}) + (1 - MM)LR\left(-\frac{\partial E^k}{\partial w^k}\right)$$

$$b^{k+1} - b^k = MM(b^k - b^{k-1}) + (1 - MM)LR\left(-\frac{\partial E^k}{\partial b^k}\right)$$

여기에서, E^k는 k번째 연산과정에서 발생되는 오차를 의미하며, t_i는 관측값, LR은 학습속도, MM은 학습과정에서 ANN이 지역 해를 탐색하게 되는 것을 보완하기 위해 제안된 모멘텀이다.



[그림 3.7.1] 인공신경망 개념도

지하수위 시계열 자료는 기본적으로 강우에 의하여 결정되므로 강우에 의한 지하수위 예측 모형을 고려할 수 있다. 그러나 이 경우에 무강우 기간에 대한 입력값이 0으로 설정됨으로 인하여 기저 지하수위의 예측에는 한계를 보이게 된다. 이를 보완하기 위하여 강우 및 지하수위 2개 인자를 입력인자로 고려하여 자기회귀 특성을 반영한 시계열 모형을 통하여 기저 지하수위의 예측의 정확성을 높일 수 있다.

$$y_t^{P_{\tau_P}G_{\tau_G}} = F^{P_{\tau_P}G_{\tau_G}}(x),\ \ x = \left\{p_{t-\tau_P}, p_{t-\tau_P-1}, \cdots, p_{t-1}, g_{t-\tau_G}, g_{t-\tau_G-1}, \cdots, g_{t-1}\right\}$$

여기에서, τ_G는 지하수위 과거 관측자료 이용 규모, $P_{\tau_P}G_{\tau_G}$는 강우 및 지하수위의 과거 관측자료를 입력 자료로 활용하는 모형에 대한 설명을 나타낸다. 이 경우에도 지하수위의 과거 관측값을 이용하기 때문에 임의 강우에 대한 지하수위 예측이나 결측 및 이상값 보정 등에 어려움이 존재할 수 있으므로 반복 예측 모형을 적용하였다. 반복 예측 모형은 시계열 예측 모델 구성 시 강우 및 지하수위의 과거 자료를 활용하는 상기 $P_{\tau_P}G_{\tau_G}$ 모형을 기본적으로 이용하며 지하수위 변화를 예측할 때 입력자료로서 과거 관측값이 아닌 과거 예측값을 반복적으로 이용하는 것으로서 다음 식에 의한다.

$$y_t^{RPR} = F^{P_\tau G_\tau}(x),\ x = \left\{p_{t-\tau}, p_{t-\tau-1}, \cdots, p_{t-1}, \hat{g}_{t-\tau}, \hat{g}_{t-\tau-1}, \cdots, \hat{g}_{t-1}\right\}$$

여기에서, $\hat{g}$는 예측된 지하수위 값을 의미하며, RPR(recursive prediciton)은 반복 예측 모형을 말한다.

○ 인공신경망에 의한 경주지진시 수위 예측

인공신경망 모델의 분석은 훈련(Training), 검증(Test), 예측(Prediction)으로 구분하여 실시하였으며, 각 분석에 사용된 기간은 아래 표와 같다. 훈련자료는 2014년의 기간으로 설정하였으며, 훈련을 통하여 구축된 모델의 검증은 2015년을 대상으로 수행하였다. 이로부터 모델의 적합성을 파악한 후 경주 지진이 발생하였던 기간인 2016년 8월부터 이후 기간에 대하여 예측을 수행하였다.

모델의 구축을 위하여 강우 및 지하수위 자료는 표준화 변환을 통하여 데이터를 보완한 후 신경망 분석을 실시하였다.

$$Standardized\ X_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

모델의 적합성을 파악하기 위하여 RMSE(Root mean squared error) 및 CORR(Correlation coefficient)를 활용하였다.

지하수위의 변화는 이전의 강우와 이전의 지하수위의 영향을 받게 된다. 강우와 지하수위의 관계를 교차상관분석(CCF)을 통하여 분석한 결과, 대부분의 관측정에서 4~5 시간의 시차를 갖고 있으며, 지하수위에 대한 자기상관분석(ACF) 결과도 유사하게 4~5 시간의 시차를 갖고 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이와 같은 교차상관분석 및 자기상관분석 결과를 토대로 인공신경망을 수행하였다. 인공신경망 분석 결과, RMSE 및 CORR을 보면 예측 지하수위가 비교적 유의하게 예측되었음을 알 수 있다(표 3.7.2).

[표 3.7.1] ANN 분석기간

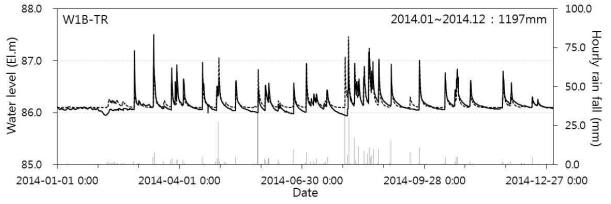
Well	TR	TS	PR
W1B	2014.01.01 ~ 2014.12.31	2015.01.01 ~ 2015.12.31	2016.08.01 ~ 2018.03.31
W2B	2014.02.01 ~ 2014.12.31	2015.01.01 ~ 2015.12.31	2016.08.01 ~ 2018.03.31
W5B	2014.05.01 ~ 2014.09.30	2015.05.01 ~ 2015.09.30	2016.08.01 ~ 2018.03.31
W8B	2014.01.01 ~ 2014.12.31	2015.01.01 ~ 2015.12.31	2016.08.01 ~ 2018.03.31
W13B	2014.01.01 ~ 2014.12.31	2015.01.01 ~ 2015.12.31	2016.08.01 ~ 2018.03.31

[표 3.7.2] ANN 분석 입력인자 조건

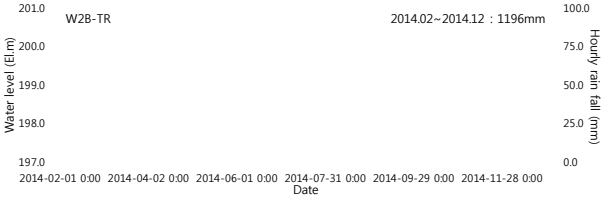
Well	입력 조건		오차지표 분석	
	Lag time (rainfall and water levels)	Lag time for auto-correlation	RMSE (m)	CORR
W1B	4	4	0.067	0.875
W2B	5	5	0.068	0.788
W5B	5	5	0.132	0.933
W8B	4	4	0.092	0.752
W13B	5	5	0.091	-0.115

이와 같이, 연구지역내 5개소 지하수위 관측 자료의 강우 영향을 제거한 지진에 의한 변동량을 계산하기 위하여, 각 관측소별 교차상관분석을 이용하여 lag time을 분석한 후 각 자료별 훈련(TR), 보정(TS), 예측(PR) 단계(표 3.7.1)로 자료를 나눈 후 모델 파라미터를 설정하고 인공신경망 분석을 실시하였다. 이후 반복 예측된 강우에 의한 변동량을 기존 지하수위 변동량과 계산하여 지진에 의한 지하수위 변동량을 계산하였다.

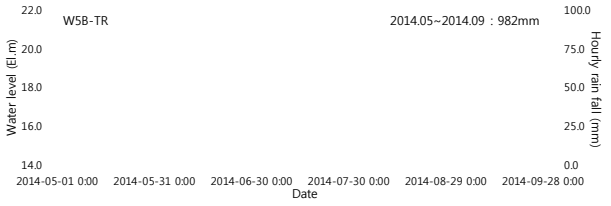
지하수위 예측 시계열 자료를 보면, 강우에 의한 각 관측정별 지하수위 변동량을 파악할 수 있다. 대표적으로, W2B의 경우에는 강우에 의한 지하수위 상승이 실제 관측 자료보다 현저하게 낮고 강우 이후 즉시 회복되는 일반적인 지하수위 변동 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나, 실제 현장 계측 자료에서는 지하수위 상승이 과다하게 발생하였고 상승된 지하수위가 회복되지 않고 지속적으로 유지되는 현상을 잘 보여주고 있다.



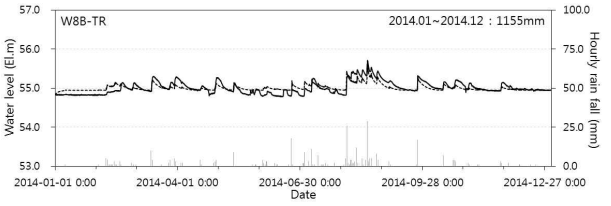
a) W1B TR



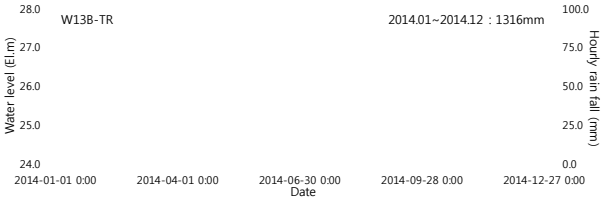
b) W2B TR



c) W5B TR

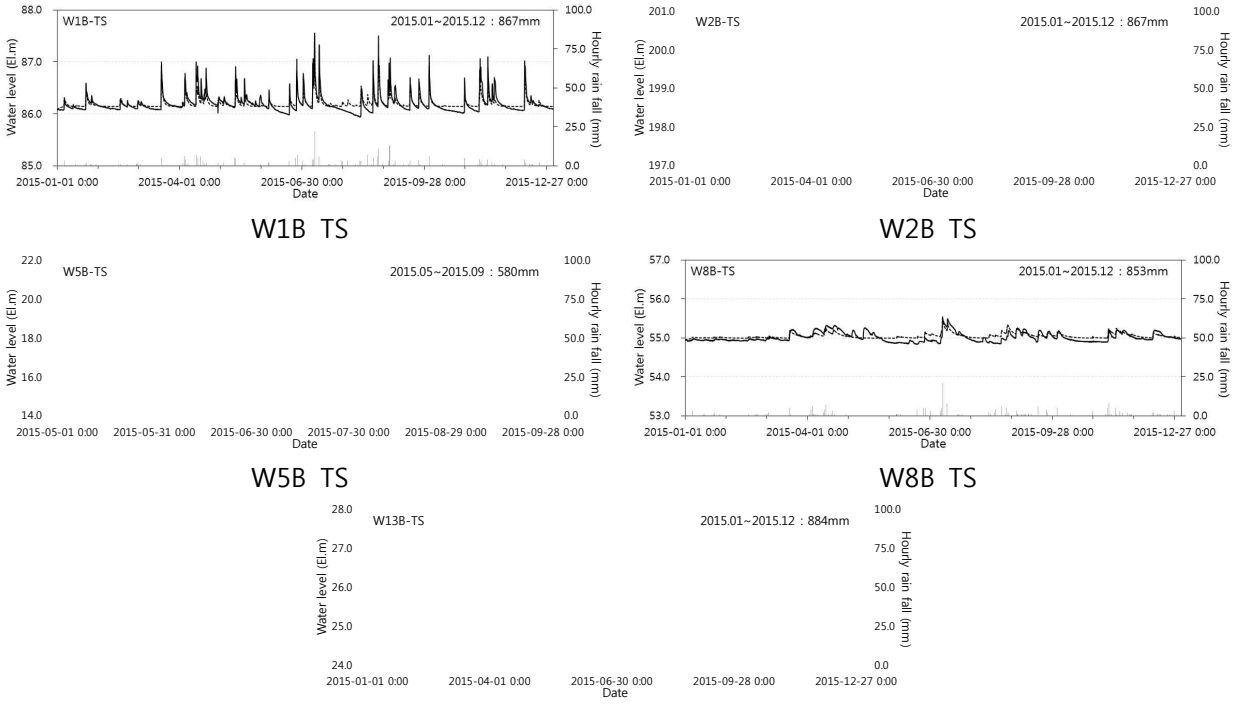


d) W8B TR

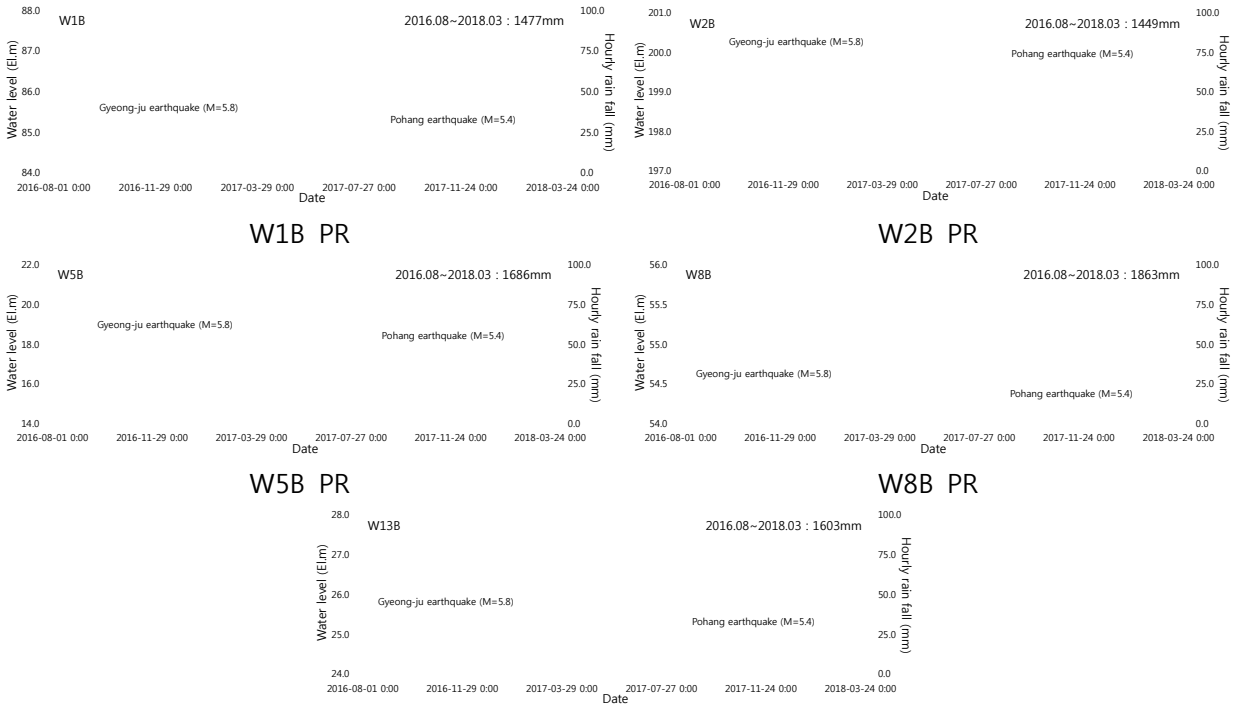


e) W13B TR

[그림 3.7.2] 인공신경망 모델에 의한 지하수위 훈련 시계열 (Training)



[그림 3.7.3] 인공신경망 모델에 의한 지하수위 검증 시계열 (Test)

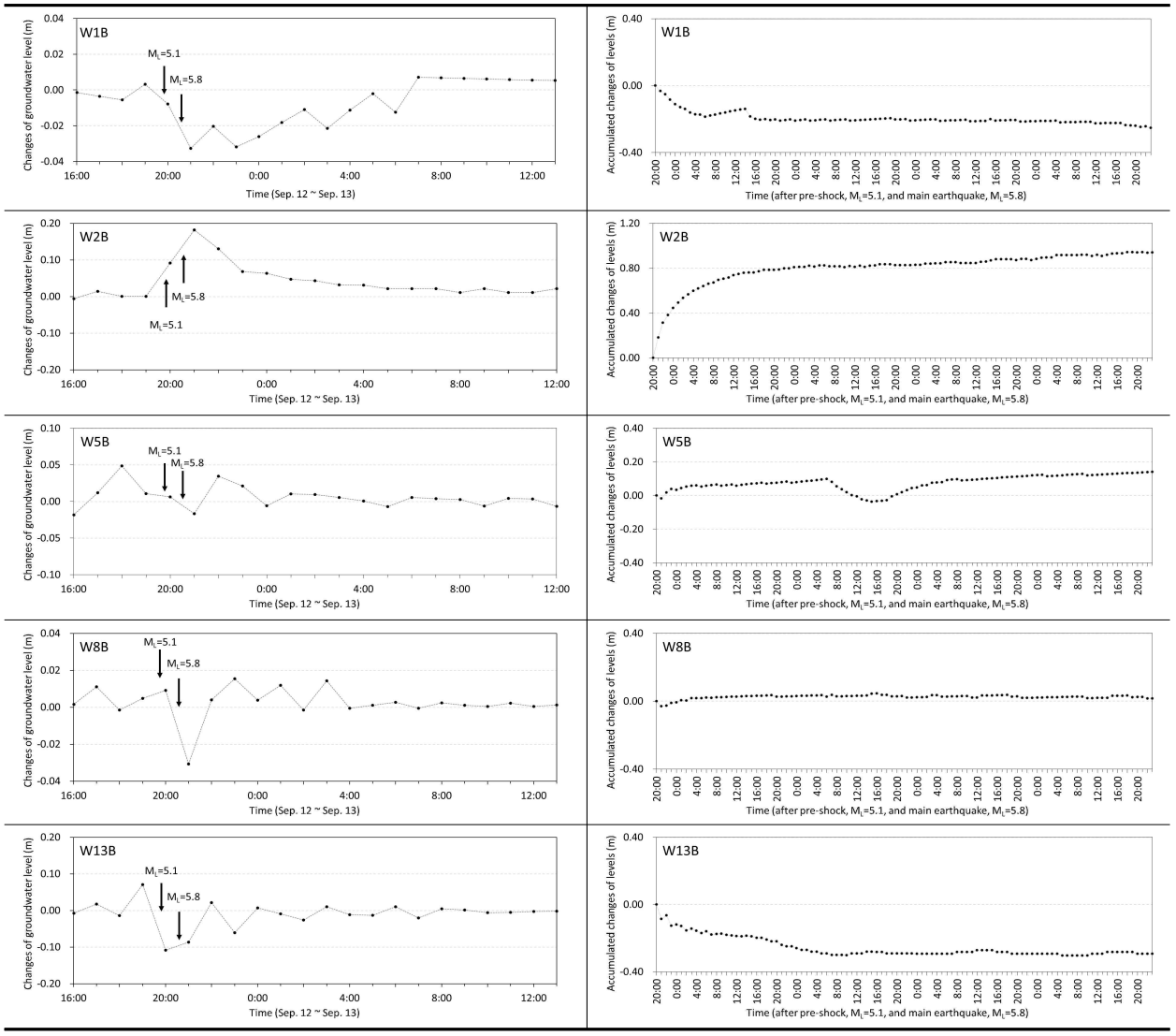


[그림 3.7.4] 인공신경망 모델에 의한 지하수위 예측 시계열 (Prediction)

실제 관측 자료와 예측 자료를 토대로 강우의 영향이 없는 지진에 의한 실 지하수위 변화량을 분석하였다. 실 지하수위 변화량은 예측된 지하수위 자료를 토대로 지진 시점 전후의 지하수위 변화를 분석한 자료를 의미한다. 본 인공신경망 분석에서의 예측 자료는 1시간 관측 자료를 기반으로 수행하였기 때문에 실제 지하수위 변화가 발생한 시점에서부터 측정 시간까지의 과정에서의 변화는 정확하게 파악하는데 한계가 존재한다.

지진에 의한 실 지하수위 변화량을 경주 지진 시점 전후로 도시해 보았다(그림 3.7.5). W1B는 전진시 지하수위가 강하하였으며 본진 이후에 지속적인 감소를 보이고 있다. W1B의 지하수위는 지진발생(8:32 PM, ML=5.8) 직후 약 3.3 cm가 하강하였고 기존 강우를 포함한 실제 관측 데이터에서의 변화는 약 3.0 cm로 나타나 강우의 영향이 약 3 mm 정도에 해당한다. 이후 여진의 영향으로 다음날 아침까지 지하수위가 하강하였다.

W2B의 지하수위는 전진(7:44 PM, ML=5.1), 본진(8:32, ML=5.8) 지진 발생시 약 9.2 cm, 18.2 cm 상승하였다. 기존의 실측 데이터에서의 변화량은 약 9.0 cm, 18.0 cm 로서 약 2 mm 정도가 강우에 의한 상승량으로 파악되었다. 본진 이후 상승율은 감소하기 시작하였으며, 지하수위는 수 일 이후 안정화되기 시작하였다. W5B와 W8B는 분석 결과 상승 및 하강이 명확하지 않고 미세한 반복적인 변화가 나타나는 것으로 보여진다. W13B는 전진(7:44 PM, ML=5.1), 본진(8:32, ML=5.8) 지진 발생시 약 11.9 cm, 8.7 cm 하강한 것으로 나타났다.



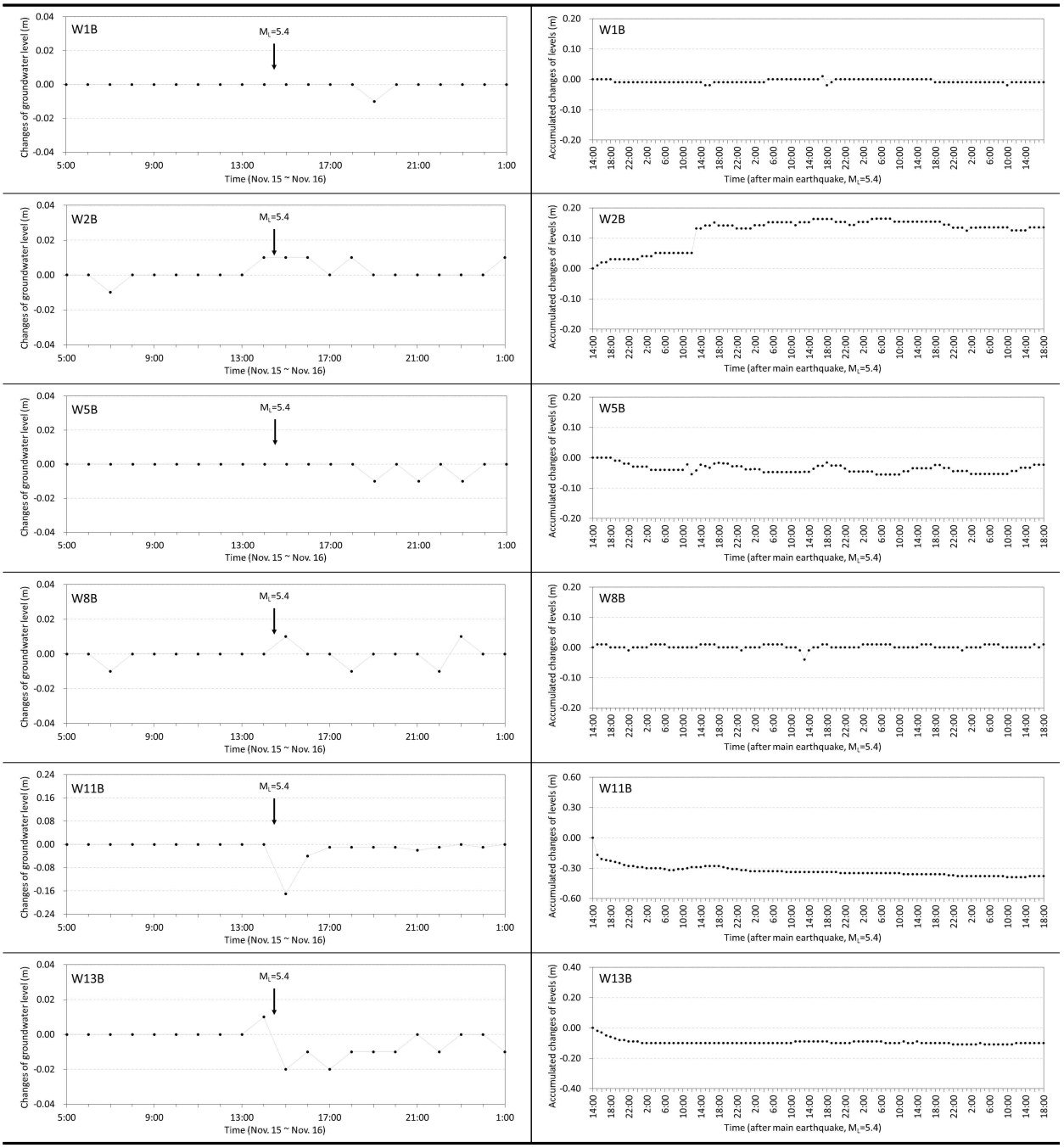
[그림 3.7.5] 경주 지진시 순 지하수위 변화량(좌) 및 누적 변화량(우)

W1B, W2B 및 W13B의 경우 타 관측정과 다소 다른 변화를 보이는데, 지진발생 후 지하수위 변화는 며칠 또는 몇 주 동안 점차적으로 변화하고 이후 몇 주 또는 몇 달 동안 안정화되는 것으로 나타났다. W1B, W2B 및 W13B의 누적 수위변화는 대략 -0.2 m, +1.0 m, -0.3 m로 나타났다. 그러나 1시간 간격 측정에 따라 지진 발생 후 몇 ~ 수십 분 후에 측정된 데이터 이므로 실제 지하수위 변화는 더 높거나 낮을 수 있다.

포항 지진이 발생한 시점에서는 지진 전후 한달 정도 강우가 발생하지 않았기 때문에 인공신경망에 의한 지하수위 예측 및 이를 활용한 지하수 변동 평가는 수행하지 않았다. 즉, 실제 관측 자료가 순수하게 지진에 의한 변동성을 반영할 것으로 가정하고 실제 관측 자료를 활용한 분석을 수행하였다(그림 3.7.6).

W2B의 순 지하수 변동량은 본진 이후 매우 작으나 누적 변화하는 특성은 수시간 동안 지속되는 것으로 나타났다. W5B의 경우 지하수위는 본진 이후 연속되는 여진에 의하여 지속적인 감소를 보이고 있으며, 이와 같은 감소는 지진 이후 수일간 지속된 것으로 나타났다.

W11B는 본진 이후에 약 17 cm의 지하수위 감소가 발생하였고 수일간 지속적인 감소 현상이 나타났다. W13B는 본진 이전인 2시경에 일시적인 상승이 존재하였으며, 이후 수일간 감소화는 특성을 보여주고 있다. W11B에서의 지하수위의 총 변화량은 약 30 cm 정도이며 W13B에서는 약 10 cm로 나타났다. 이들이 안정화되는 기간은 수주 또는 수개월동안 지속되었다. 이와 같은 지속적인 변동성의 유지 현상은 지진 응력에 의하여 변하된 지반의 투수성이 영속적으로 변화된 상태로 유지되기 때문으로 보인다.

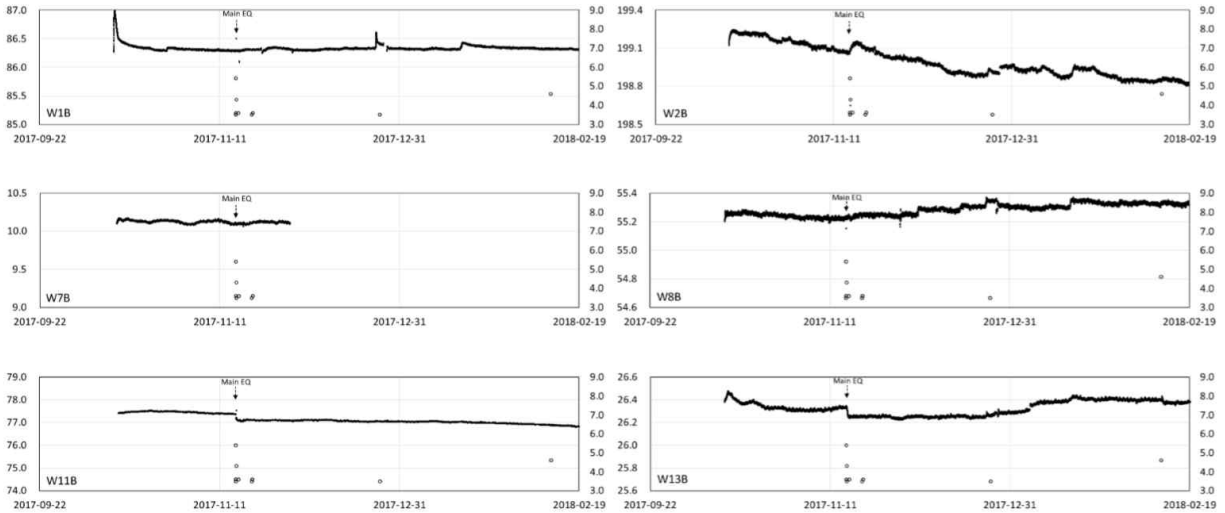


[그림 3.7.6] 포항 지진시 순 지하수위 변화량(좌) 및 누적 변화량(우)

8. 관측 주기에 따른 수위 변동 평가

경주 지진 이후 지하수위를 활용한 지진의 평가에 대한 필요성이 인지되면서 조밀한 지하수위 관측을 위한 지하수 측정 장치를 현장에 설치하였다. 지하수위, 온도 및 전기전도도를 측정할 수 있는 센서를 국가지하수관측정내에 설치하였으며, 측정 간격은 5분 간격으로 설정하였다.

총 6개의 지하수 관측정에 5분 간격의 수위 측정 센서를 설치하였으며, 이로부터 취득된 시계열 자료는 그림 3.8.1과 같다. 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, 특이하게 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 3.8.1).



[그림 3.8.1] 포항 지진시 지진 발생 및 지하수위의 장기간 변화 (5분 자료)

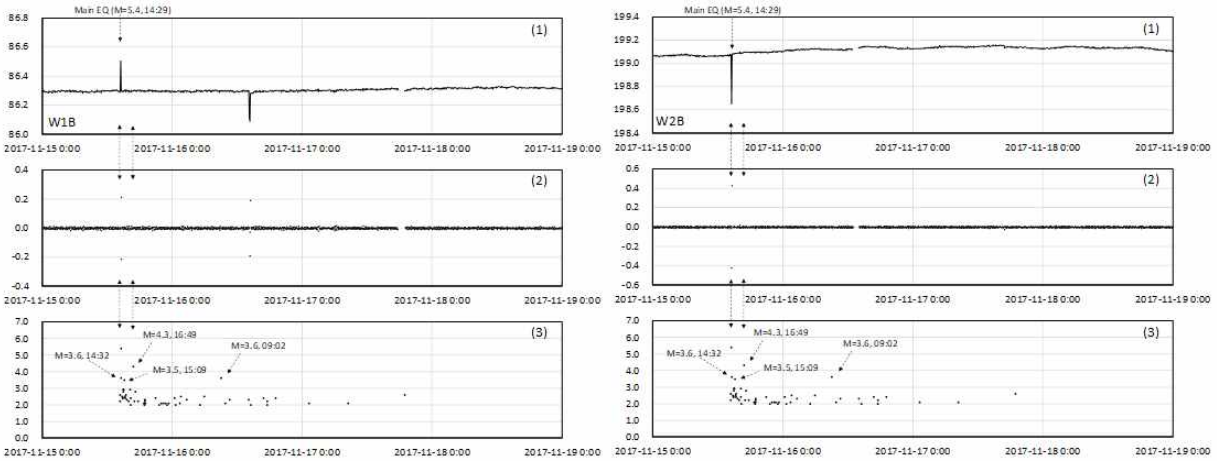
W2B는 본진 직후 14시 30분에 약 42.0 cm의 지하수위 강하가 나타났으며 이후 여진 시에는 완만한 수위 상승이 수반된 후 18일부터 하강 패턴으로 변화되었다. W7B는 본진 및 여진에 따른 수위 변화가 거의 나타나지 않았다. W8B는 본진 직후인 14시 30분에 약 7.1 cm의 수위 강하가 측정되었으며, 즉시 회복된 이후 16시 49분의 여진(M = 4.3)의 영향으로 16시 50분에 약 2.1 cm의 수위 상승이 발생한 것으로 측정되었다. W11B는 본진 직후인 14시 30분에 약 17.1 cm의 순간적인 지하수위 하강이 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 유지하고 있다(그림 3.8.1).

Shi et al.(2015)의 지진 분류 체계에 의하면, 5분 간격의 측정자료를 토대로 포항 지진의 지하수위 변동은 3가지 유형으로 분류가 가능하다. Oscillation, stpe drop-oscillation 및 gradual drop-oscillation. W1B, W2B 및 W8B는 지진 전후에 지하수위 변동이 거의 없으며 oscillation의 변동성을 보이는 경우이다. 이들 관측정에서의 oscillation 변동량은 위에서 언급한 21 cm, 42 cm, 7 cm에 해당한다. 본진 동안의 oscillation은 1시간 간격의 지하수위 관측자료에서는 나타나지 않게 되어 조밀한 간격의 지하수위 측정을 필요로 한다. W11B의 지하수위 변동은 지진 이후 17 cm 정도의 순간적 강하가 발생하였으며 장기간 동안 유지되는 특성이 나타났다. W13B는 gradual drop-oscillation의 유형에 해당되며, 12시간 정도 감소하는 현상을 보이다가 이후 안정화되어 유지되는 특성을 보인다.

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

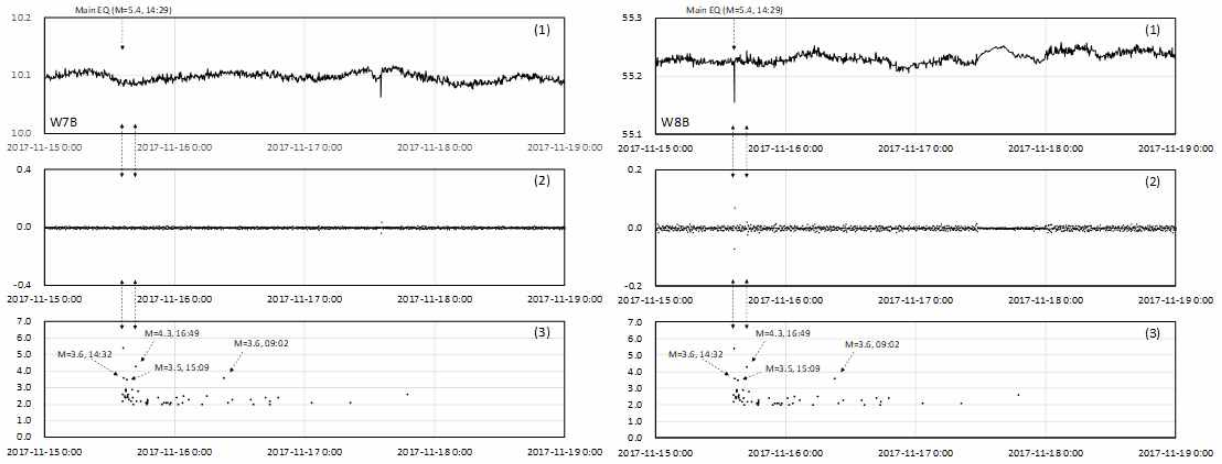
$$\log e = 1.5M - 3.0\log r - 4.2$$

여기에서, e는 에너지 밀도 (J/m^3), M은 지진의 규모, r은 거리(km)를 의미한다. 이 식을 토대로 규모 3.0 이상의 주요 지진을 대상으로 각 관측정에서의 에너지 밀도를 산정하였다 (표 3.8.1). 최대 지진 규모인 본진 발생시 진앙에 가까운 W11B는 약 8.42 J/m^3의 값을 보이고 있어 근거리 지진 영역(∞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 지진시 균열대 투수성의 증가로 인한 지하수 배출에 의한 수위 변동이라는 해석으로 설명이 된다.



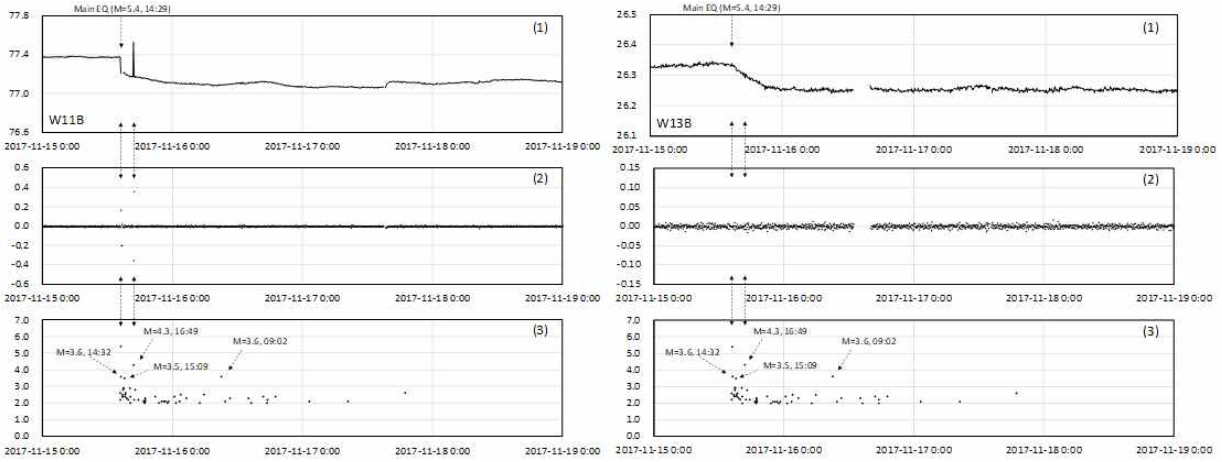
(a) W1B (b) W2B

[그림 3.8.2] 포항 지진 전후의 지하수위 변화 특성 (5분 자료)



(c) W7B

(d) W8B



(e) W11B

(f) W13B

[그림 3.8.2] 포항 지진 전후의 지하수위 변화 특성 (5분 자료)(계속)

W13B의 경우에는, 근거리 지진 영역에서 약간 벗어나 있지만, 지진 이후 장기간의 낮은 지하수위 유지 특성이 나타나고 있어 미고결층의 팽창에 의한 지하수위 하강(Wang et al., 2001) 또는 암반 파쇄대내 클로깅 물질 제거 또는 파쇄대 확장에 의한 투수성 증가에 기인한 지하수위 하강(Rojstaczer et al., 1995; Wiesner, 1999)에서 원인을 검토할 수 있으나, 전자의 경우 본 지점의 충적층이 매우 얇아 가능성이 낮으며, 후자의 파쇄대의 변화에 의한 것으로 추정할 수 있다. 기존 연구에 의하면 $\sim 10^{-4}\ J/m^3$의 낮은 에너지 밀도에서도 지진은 파쇄대 내의 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 충적층이 두껍고 미고결층의 압축작용에 의하여 미세한 지하수위 상승(cm 규모)이 수 일 이상 유지되는 것으로 보인다(그림 3.8.1, 그림 3.8.2).

기존의 연구(Chia et al., 2001; Wang 2001; Brodsky et al., 2003)에서는, 근거리 지진영역(near field)에서 step-like의 지하수위 변화가 발생되고, 중거리 지진영역에서는 점진적인 변화, 원거리 지진영역에서는 oscillation이 발생한다고 연구된 바 있다. W11B 및 W13B는 거의 근거리 지진영역(15 km 이내) 이내에 해당되어 step-like 변화를 보이며, W1B, W2B, W8B는 중거리 및 원거리 지진 영역에 해당한다

[표 3.8.1] 지진 규모에 의한 에너지 밀도 추정 결과

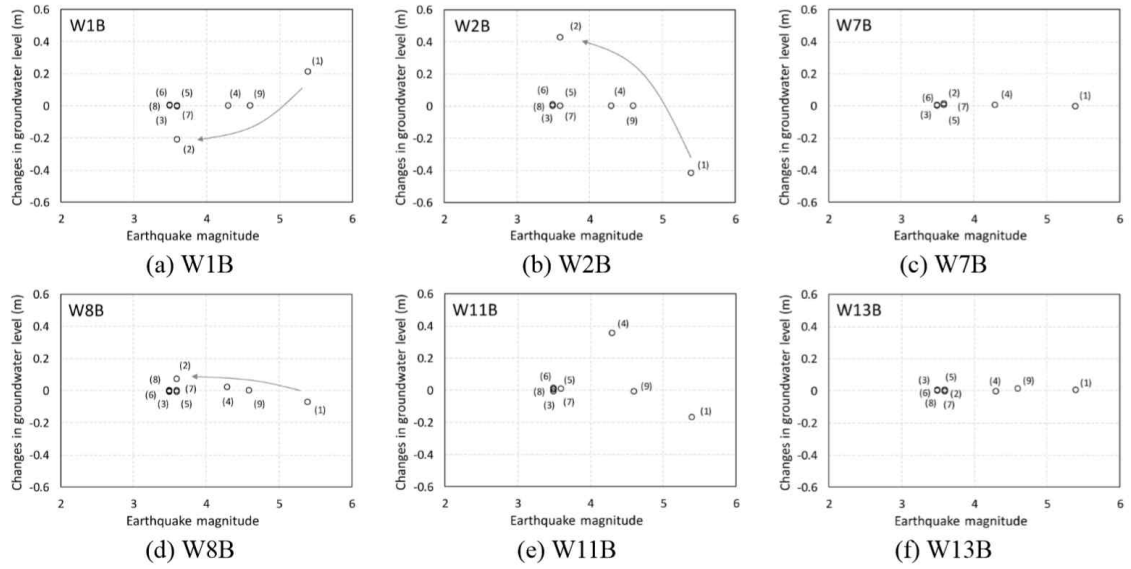
(unit: J/m^3)

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

1시간 간격의 관측 자료와 5분 간격의 관측 자료를 비교해 보면, 5분 간격의 관측자료에서는 변화량이 측정이 되었으나, 1시간 간격 자료에서는 변화가 측정되지 않는 등 oscillation 또는 step-like 변동 특성을 갖는 변동 지하수위에 대해서는 조밀한 간격의 분석의 필요성이 나타났다. 즉, 지하수관측소의 1시간 자료와 5분 자료의 지하수위 데이터를 비교한 결과 수위 변동패턴은 비슷하나 1시간 시계열 데이터에서는 단계 또는 점진적인 변화만 나타나지만 5분 자료를 보면 지진 발생 직후 순간적인 지하수위 상승 또는 하강, 진동현상이 관측되었다. 따라서 지진발생시 순간적인 변화를 파악하려면 측정간격을 조밀하게 측정하여야 한다.

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 3.8.3). 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.

W2B는 NNE 방향의 단층에 인접한 계곡부에 위치하고 있으며 하부의 심성암 위에 미고결층이 얇게 분포하고 있다. 이와 같은 지형적 및 지질적 특성은 지하수위를 증가시킨 것으로 보인다. 지진에 의하여 야기된 균열대의 투수성의 증가가 주변의 물을 지하로 유입하는 현상을 가져온다는 기존 연구와 관련이 있어 보인다(Wang et al., 2004). W13B는 비교적 높은 구릉지에 위치하고 있으며 주변에 유입수의 근원이 존재하지 않는 지역으로서 지하수의 흐름은 기본적으로 주변 지역으로 흘러나가는 지역에 해당하며 기반암은 Miocene 퇴적암으로서 신생대에 해당한다. 지진이 퇴적암내의 파쇄대를 활성화시키고 투수성을 제고하였으며 이는 지하수의 배출을 발생시킨 것으로 보여 지하수위가 하강한 것으로 보인다(Wang et al., 2004).



[그림 3.8.3] 지진 규모와 지하수위 변화의 상관 관계 ((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)).

경주 지진과 달리, 포항 지진은 액상화를 야기시켰으며 약 300개의 sand blow를 발생시켰다. 이는 주로 진앙지 주변 약 3 km 이내인 근거리 지진영역(near field)에서 발생하였으며 가장 먼 것은 약 15 km 떨어진 곳에서도 나타났다(Gihm et al., 2018). Miocene 퇴적암내의 공극압은 지진 응력에 의하여 쉽게 변화가 발생하였으며, 공극압이 증가하게 되면 유효응력이 거의 0에 가까워지고 액상처럼 변화하게 되어 액상화가 발생하게 된다. Wang(2007)은 액상화의 임계 거리와 에너지 밀도 및 지진 규모의 관계를 다음과 같이 표현한 바 있다.

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

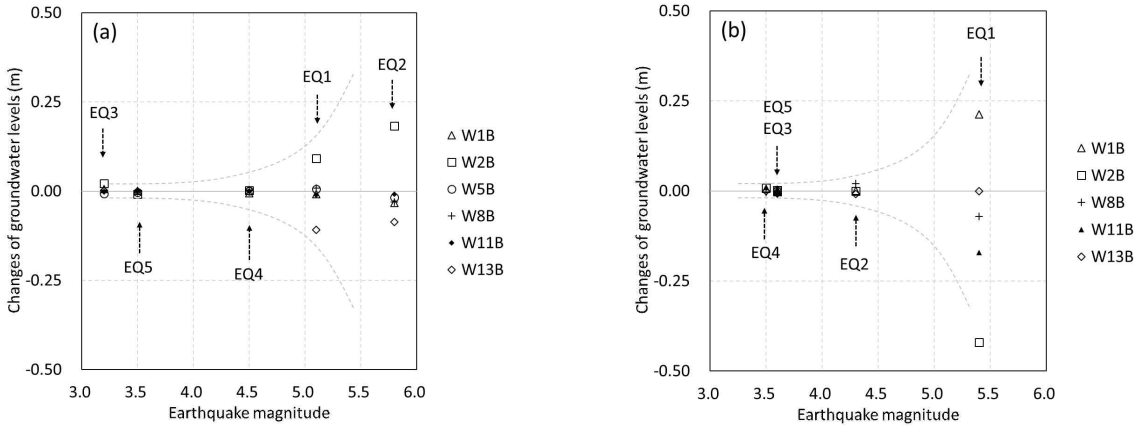
여기에서, r은 km, e는 J/m^{3}이다.

포항 지진시 진원지에서 W11B까지의 거리를 산정해 보면 약 10 km로서 근거리 지진영역(near field)에 해당한다. 이 때 에너지 밀도는 약 8.42 J/m^{3}이다. 이와 같은 결과는 포항 지진시 액상화에 의한 지반 변형이 진앙 주변에서 관측정에서의 지하수위 변화를 야기하는게 기여한 것으로 분석된다.

9. 지진과 지하수의 공간적 상관성

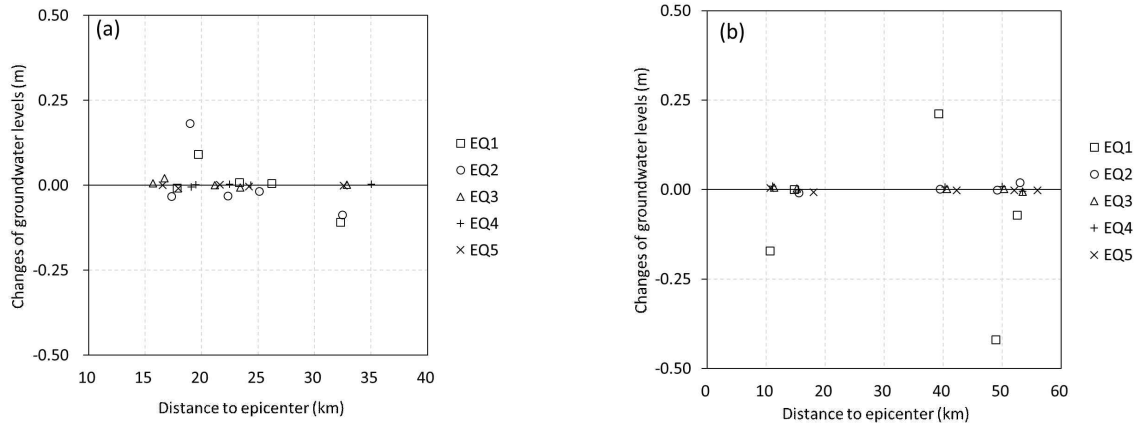
지하수위 변동과 지진의 규모(M>3.0)와의 상관관계를 도시해 보면, 지수함수적인 분포 범위 내에 도시됨을 알 수 있다. 이는 경주 지진 및 포항 지진 모두에 해당되는 결과이다. 즉, 경주 지진의 경우에는 1시간 간격의 측정 자료를 토대로 분석한 결과이며, 포항 지진의 경우에는 5분 간격으로 측정한 결과임에도 불구하고 동일하게 지수함수적 분포 범위 내에 도시됨을 알 수 있다(그림 3.9.1).

반면에, 지하수위 반응과 진원지까지의 거리를 도시한 결과, 경주 및 포항 지진시 뚜렷한 상관관계를 보이지는 않는 것으로 나타났다(그림 3.9.2). 이와 같은 결과는 기존의 연구(Shi et al., 2015)에서 제시한 진원지와 거리와 지하수위 변동량이 일정 상관성을 갖는다는 결과와는 다소 다른 결과가 나타났다. 이와 같은 상관성이 낮은 결과에 대한 해석은 다음과 같이 가능할 것으로 본다.



(a) 경주지진 (b) 포항지진

[그림 3.9.1] 관측소별 규모에 따른 수위변동특성



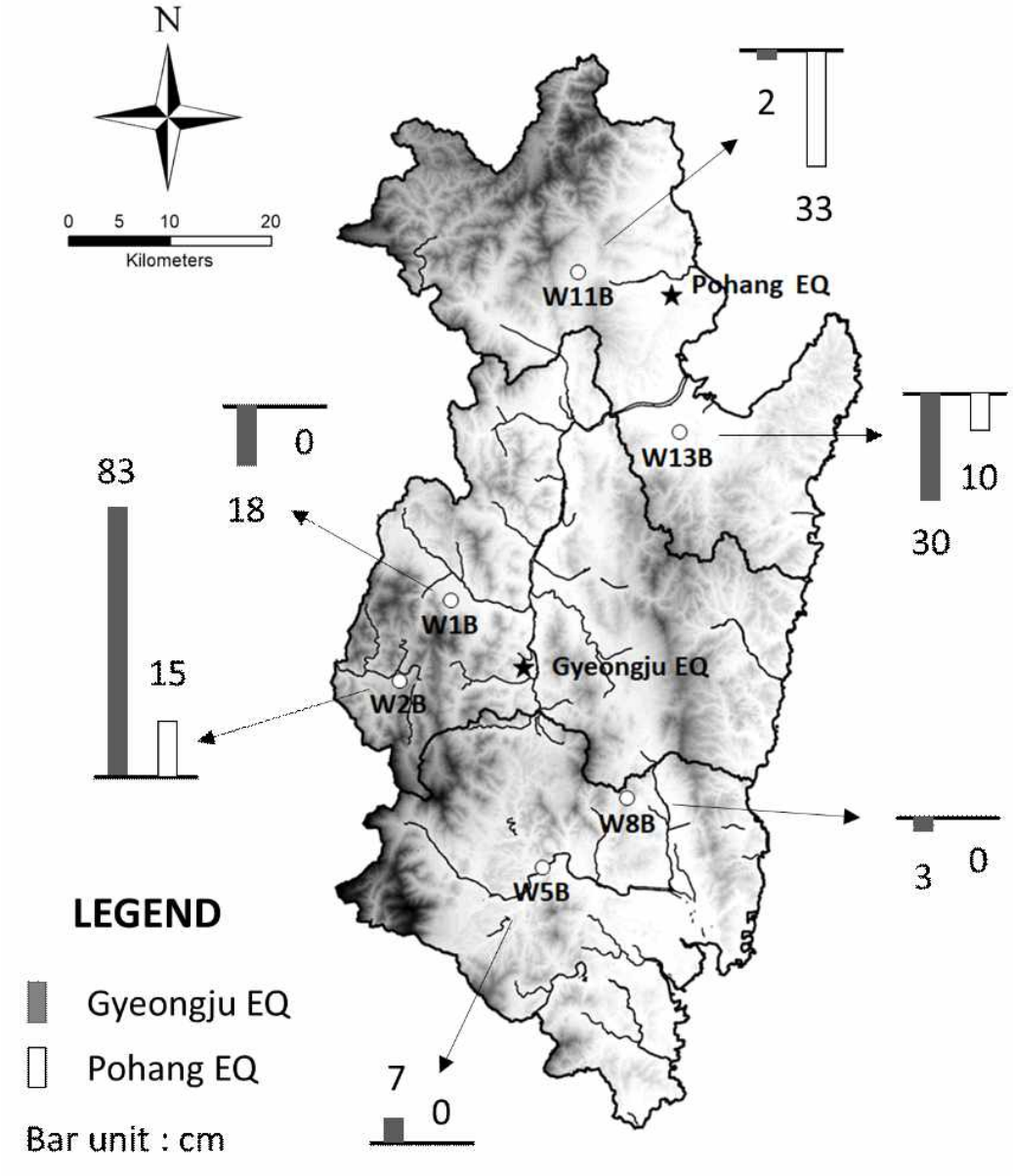
(a) 경주지진 (b) 포항지진

[그림 3.9.2] 관측소별 거리에 따른 수위변동특성

각 관측 지점에서의 지질학적인 상태에서의 이방성이 거리에 따른 지하수위 변동량의 상관성에 영향을 미치는 것으로 파악된다. 에너지의 규모적 관점 및 응력의 방향별 분포의 관점에서 본다면 거리에 따른 지하수위 변동량이 일정한 상관성을 나타내는 것이 바람직해 보이나 각 관측 지점의 지질학적 이방성이 이와 같은 거리에 따른 상관성의 의미를 상쇄시키는 것으로 보인다. 이는 각 관측정의 깊이가 불과 약 60 m 정도에 불과하여 수 십 km 떨어진 지점에서 전파되어 오는 에너지의 소산과 소실에 의한 작용이 중간 경로에 위치한 지질의 이방성으로 인하여 상쇄되는 것으로 추정된다.

또한, 지하수 관측정의 깊이가 얕기 때문에, 암반 내에서의 응력 작용 뿐 아니라 상부 충적층에서의 응력작용도 지하수위 변화에 영향을 미칠 것으로 보인다. 이는 지진 작용으로 인한 퇴적물 및 파쇄대내에서의 비선형성이 지하수위 변화에 영향을 미쳐 거리에 따른 수위 변화의 일관성을 저감시키는 것으로 보인다. 경주 지진의 경우, 진원지의 깊이가 약 12.0 ~ 15.5 km로서 백악기 암석내에서 발생하였으며 이는 포항지진의 진원지 2.0~5.6 km (Miocene 퇴적암류)와는 차이가 존재한다. 두 진원지와 각 관측지점 사이의 지질학적인 차이점(경암의 종류, 비결정질 및 반고결층의 존재 여부 등)이 지진에 의한 흔들림 작용에 차이를 가져왔으며 응력의 감쇄 과정에서도 차이가 존재하게 된다. 경주 지진시 W2B(19 km)가 W13B(32 km)보다 진원지에 가까움에도 불구하고 지하수위 상승 이후 준 영구적인 지하수위 변화가 나타났다. 지하수 관측 지점에서의 다양한 암석 특성이 이와 같은 거리에 따른 불일치성을 설명해 준다. W2B에서의 누적된 지하수위 변화량은 지진 응력의 누적에 의하여 나타나는 것으로 보이는데, 원거리 지진영역에서의 준 영구적 또는 영구적 지하수위 변화와 관련성이 있다(Chia et al., 2001).

포항 지진시 누적 지하수위 변화량의 현저한 변화(약 15 cm)가 W2B에서 발생하였는데, W2B의 경우 진원지에서의 거리가 약 49 km로서 경주 지진시의 진원거리(약 19 km)보다 매우 원거리임에도 불구하고 이와 같은 지하수위 변화가 발생하였다(그림 3.9.3). 또한, W13B는 포항지진시 진원까지 약 15 km로서 W2B보다 훨씬 가까움에도 불구하고 누적 지하수위 변화량이 10 cm 정도로서 W2B의 15 cm 보다 작게 나타났다. 이와 같은 현상이 Shi et al.(2015)의 연구 결과인 “진원지까지의 거리와 지하수위 변화량의 상관성”과는 다소 다른 결과가 나타났다.



[그림 3.9.3] 경주 및 포항지진시 관측소별 지하수위 누적변동량의 분포

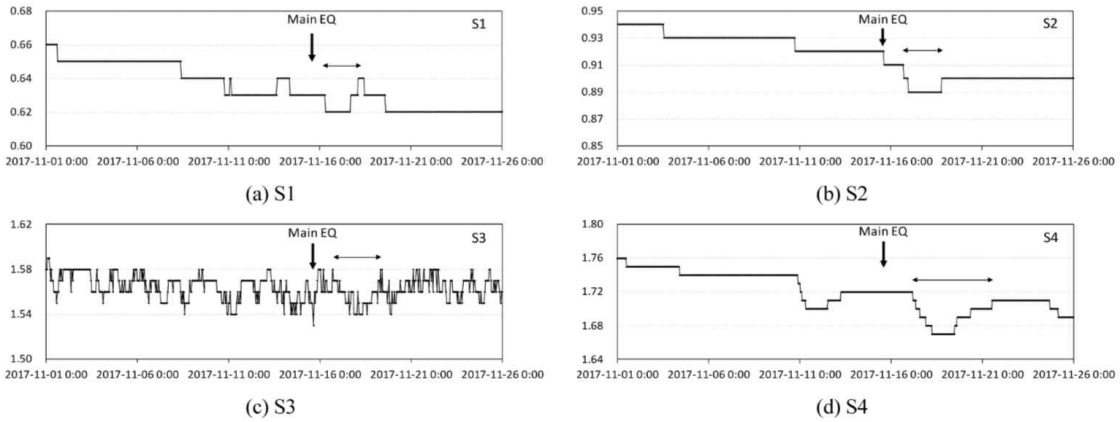
10. 하천 유량 변동

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 km^3의 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 m^3 증가하였으며 인근 산지 지형으로부터 지하수가 유입, 배출된 것으로 평가된 바 있다(Wang and Manga, 2015).

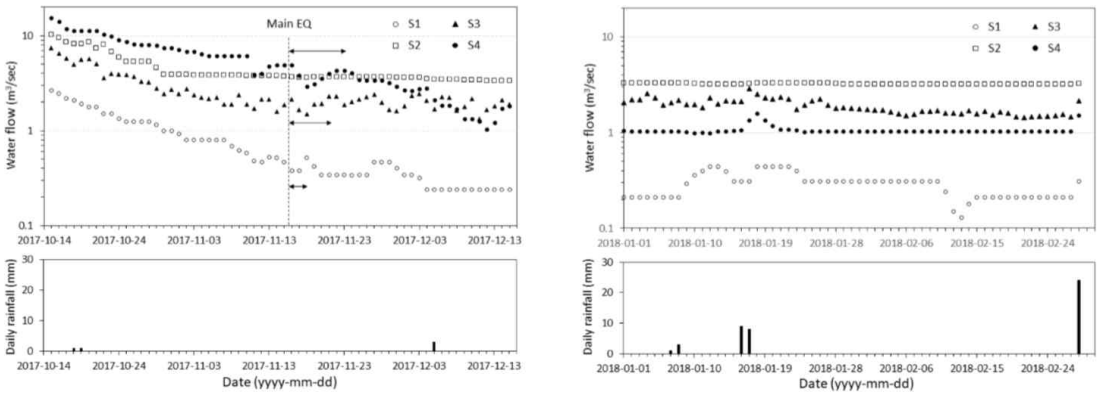
형산강을 따라 위치한 5개의 하천 유량 관측지점의 수위 및 유량 자료를 보면, 강우가 없었음에도 불구하고 지진 전후로 변화가 나타났음을 알 수 있다(www.wamis.go.kr). 조위의 영향을 받는 S5 지점(관측장비 영점 표고: -1.094 El.m)을 제외하고 상류에서부터 지진 직후 하천 수위 변화량은 S1에서 11월 16일 7시에서 8시 사이에 0.01 m 하강후 0.02 m 상승 및 하강 후 유지, S2는 지진 직후부터 17일 00시까지 0.03 m 하강 후 0,01 상승하여 유지, S3은 지진과 동시기적으로 0.02 m 하강후 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 3.8.2). 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 m^3/s에서 16일 0.38 m^3/s로 감소 (변화량: 0.09 m^3/s) 및 18일 0.52 m^3/s로 증가 (0.14 m^3/s) 하였으며, S2는 15일 3.75 m^3/s에서 17일 3.6 m^3/s으로 감소 (0.15 m^3/s) 및 19일 3.65 m^3/s로 증가 (0.05 m^3/s) 하였다. S3는 16일 2.14 m^3/s에서 18일 1.49 m^3/s로 감소 (0.65 m^3/s) 한 후 21일 2.29 m^3/s로 증가 (0.80 m^3/s) 하였다. S4는 16일 4.91 m^3/s에서 18일 2.93 m^3/s로 감소 (1.98 m^3/s) 한 후 22일 4.28 m^3/s로 증가 (1.35 m^3/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 지배면적의 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 7(a), 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 3.10.1에서 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 m^3 (11월 15일~16일), S2는 12,960 m^3 (11월 15일~17일), S3은 56,160 m^3 (11월 16일~18일), S4는 171,072 m^3 (11월 16일~18일)이며, 상승 기간의 총 유량은 S1은 12,096 m^3 (11월 16일~18일), S2는 4,320 m^3 (11월 17일~19일), S3은 69,120 m^3 (11월 18일~21일), S4는 116,640 m^3 (11월 18일~22일)로 나타났다.



[그림 3.10.1] 하천 수위 관측소에서의 수위 시계열도 (x axis: time (hourly data), y axis: height (m)).



[그림 3.10.2] 포항 지진 이후의 하천 유량 변화 시계열도

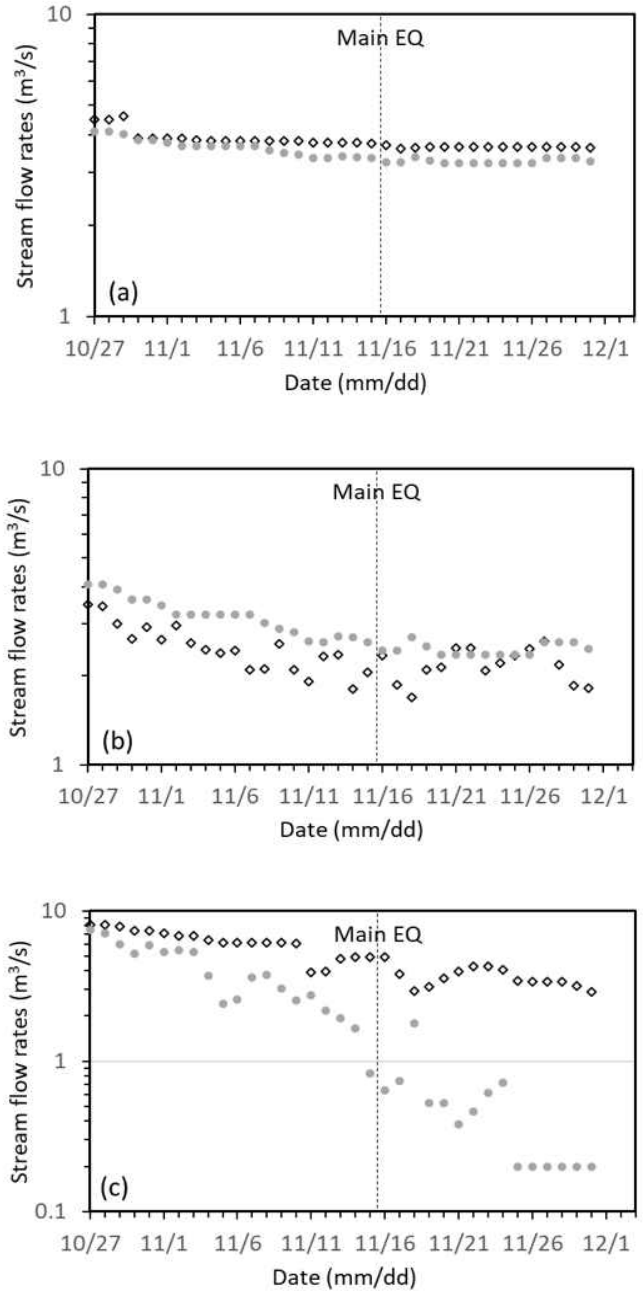
하류의 지진 영향이 상대적으로 클 것으로 예상되는 S3 및 S4 지점의 하천 유량 변동 주기성을 검토해 보았다. S3의 경우 11월 25일 이후에는 5 일 정도의 주기성인 반면에 지진 직후에는 6 일정도, S4의 경우에는 11월 25일 이후에는 5일 정도인 반면에 지진 직후에는 6 ~ 7 일 정도로 나타났다. 이와 같은 점은 지진 직후의 수위 변화로 지하수와 하천의 상호 작용에 일시적 변화가 존재하였을 가능성을 보여준다.

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 3.10.2(b)). 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 평시 갈수기와 비교하여 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).

한편, 지진에 의한 실제 하천 유량의 순 변화량을 평가하기 위하여 인공신경망을 활용한 각 하천 관측지점에서의 하천 유량을 추정해 보았다(그림 3.10.3). 이 추정 값과 실제 하천 유량값과의 비교를 통하여 지진시 발생된 하천 유량의 순변화량을 평가하였다.

2017년 11월의 하천 유량 예측을 위하여 사용된 훈련 및 검증 자료는 2014년 1월부터 2017년 9월까지 각각의 하천 수위 관측소의 하천 유량 자료를 활용하였다. 추정된 자료와 실측 자료의 검증 데이터에 대한 Pearson 상관계수는 관측지점 S2, S3, S4에 대하여 각각 0.988, 0.978, 0.966로 분석되었다. 측정 자료와 실측 자료의 차이로부터 지진시의 하천 유량의 변화를 분석할 수 있다.

2017년 11월은 강우가 없었던 기간으로서 자연적인 하천 감쇠곡선의 특성을 보이게 된다. 상류에 위치한 S2의 경우, 예측값과 실측값의 차이가 매우 작으나 지진발생 시점에서의 하천 유량값이 약간의 하향 변동을 보이는 것으로 나타났다. S3 지점의 경우, 예측값보다 실측값의 변동성이 큰 것으로 나타났으며, S4의 경우에는 실측값과 예측값의 차이가 상대적으로 크게 나타났다. 하류에 위치한 S4는 포항 지진과 비교적 가까운 위치에 위치하고 있으며, 지진시 최대 하천 유량은 예측값과 비교하여 1.98 m^3/s 정도 높으며 상승된 유량이 약 20일간 지속되는 것으로 나타났다. S4 지점에서의 포항 본진 이후의 이 기간 동안의 평균적인 일 상승량은 1.1 m^3/s 정도이며, 20일간의 총 상승량은 95 천m^3/d 정도로 평가되었다.



[그림 3.10.3] 인공신경망에 의한 하천 유량 예측과 실측 자료의 비교 (closed: 예측값, open: 실측값)

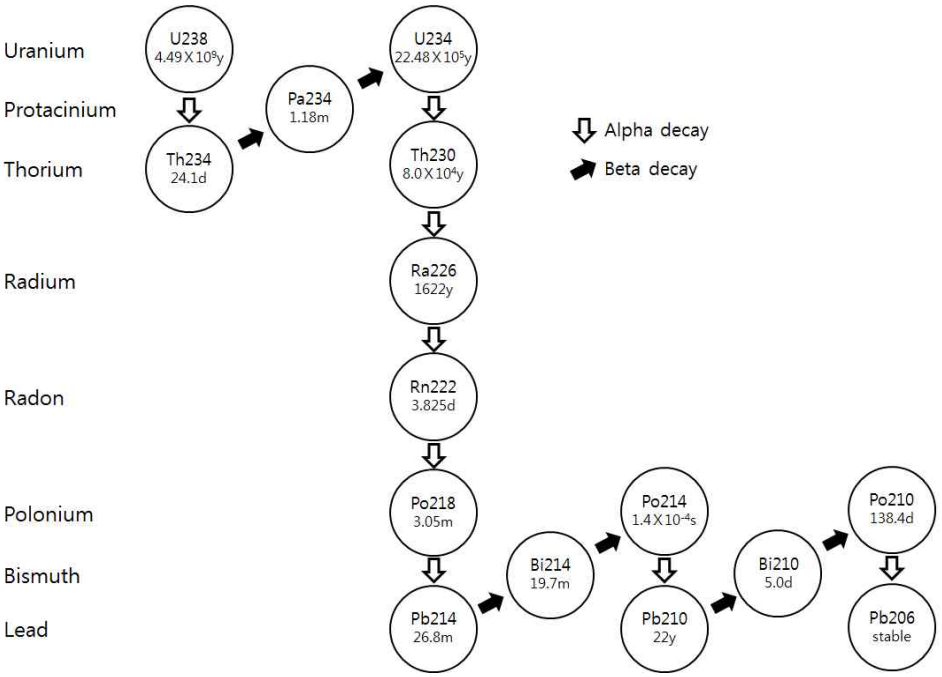
과거의 연구에 의하면, 하천 유량 변화의 가능한 기작으로는 (1) 탄성 변형의 변화, (2) 투수성의 증가, (3) 퇴적물의 고화 및 액상화, (4) 통기대 물의 배출 등으로 설명이 된다. 이와 같은 각각의 기작은 하천 유량 증대의 요인으로 모두 가능한 기작이 될 수 있다. 퇴적층내에서의 연속적인 압축, 팽창 및 액상화 작용 및 균열대내에서의 파쇄대의 투수성 증가 등은 하천 유량 증가의 요인으로 가능하다. 이는 본 지역의 경우, 포항 지진 진앙지 기준으로 약 15 km 이내에서 액상화 및 mud blow가 발생하였으며, 에너지 밀도 약 10^{-3} J/m^{3}의 경우 지하수위 변화가 발생할 수 있다는 기존 연구에 따라 S4 지역에서의 하천 유량 변화의 기작으로 설명이 가능하다. 반면에, 상류지역인 S2 인근에 위치한 W1B 및 W2B는 이와 같은 액상화의 범위에 해당되지 않지만 지진 응력으로 인한 암석내 파쇄대 투수성의 변화가 하천 유량에 기여한 것으로 예상할 수 있다.

11. 지하수내 라돈의 변화 특성

○ 라돈의 방출 개념

비수용성 불활성 기체(nobel gas)인 라돈의 지하수내에서의 방출은 환경 추적자로서의 역할을 담당하게 되는데, Rn222의 형태는 U238의 붕괴에 의하여 형성된다. Rn222는 U238에서 시작하여 Ra226의 중간 과정을 거치게 된다(그림 3.11.1).

Ra226의 경우 반감기가 1622년에 이르나 Rn222는 반감기가 3.82일에 불과하여 환경 추적자로서 중요한 역할을 담당한다. Rn222는 Pb210이나 Pb206으로 급격히 변해나가게 된다. 따라서 모암이 화강암과 같이 우라늄을 다량 함유하는 지층은 라돈 방출이 많을 것으로 알려져 있다.



[그림 3.11.1] 우라늄-238의 붕괴 과정

라돈의 확산을 설명하는 대표적인 이론은 Plane sheet model로서, 분자 확산이 한 방향으로 이루어짐을 고려할 때 다음의 Fick's second law에 의해 설명이 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

여기에서, C는 원소 함량, D는 z에 따른 확산계수를 의미한다. $C(z,t)$의 함수는,

$$C(z,t) = \frac{4C_0}{\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\left\{\left(\frac{(-1)^n}{2n+1}\right)\times\cos\left(\frac{(2n+1)\pi z}{2a}\right)\times\exp\left(\frac{-D(2n+1)^2\pi^2 t}{4a^2}\right)\right\}$$

이며, a는 slab의 절반에 해당하는 값이다.

방사능을 고려하면, 위 식은 Ra226과 붕괴 기간에 의하여 생성된 성분에 의하여 라돈에 대하여 수정된 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C_{Rn}}{\partial t} = \lambda_{Ra} C_{Ra} - \lambda_{Rn} C_{Rn} + D\frac{\partial^2 C_{Rn}}{\partial z^2}$$

C_{Ra}와 C_{Rn}은 각각이 농도(atom/g)를 나타내며, λ_{Ra}과 λ_{Rn}는 Ra226과 Rn222의 붕괴상수를 나타낸다.

함수 $K(z,t)$는, $K(z,t) = \left(C_{Rn}(z,t) - (\frac{\lambda_{Ra}}{\lambda_{Rn}} C_{Ra})\right)\exp(\lambda_{Rn} t)$로 표현되며, 이 두 식을 연결하면, $\frac{\partial K}{\partial t} = D\frac{\partial^2 K}{\partial z^2}$이 되며, Fick's second law는 함수 $K(z,t)$에 의해 표현된다.

Fick's law은 변수의 분리에 의해 Plane sheet geometry에 일반적으로 활용이 되나, 이 방법은 초기와 경계조건에 대해서 잘 적용되지 못하는 편이다. 몇몇 연구는 이 slab에서의 열전도에 대한 연구 등을 통하여 $K(z,t)$를 다음과 같이 풀이한 바 있다.

$$K(z,t) = -C_{RnEq}\exp(\lambda_{Rn} t)\frac{\cosh\left(z\sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}}\right)}{\cosh\left(a\sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}}\right)} + \frac{4C_{RnEq}}{\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n \exp\left(\frac{-(2n+1)^2\pi^2 Dt}{4a^2}\right)}{(2n+1)\left[1+\left(\frac{4\lambda_{Rn}a^2}{(2n+1)^2\pi^2 D}\right)\right]} cos\frac{(2n+1)\pi z}{2a}$$

이 식은 위의 식과 결합하여,

$$C_{Rn(z,t)} = C_{RnEq} - C_{RnEq}\frac{\cosh\left(z\sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}}\right)}{\cos\left(a\sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}}\right)} + \frac{4C_{RnEq}}{\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n \exp\left(-\left(\frac{(2n+1)^2\pi D}{4a^2}+\lambda_{Rn}\right)t\right)}{(2n+1)\left[1+\left(\frac{4\lambda_{Rn}a^2}{(2n+1)^2\pi^2 D}\right)\right]} cos\frac{(2n+1)\pi z}{2a}$$

로 표현된다. 양 측에 λ_{Rn}을 곱하면, $C_{Rn}(z,t)$의 활성도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{Rn(z,t)} = C_{Rn} - C_{ra}\frac{\cosh\left(z\sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}}\right)}{\cos\left(a\sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D}}\right)} + \frac{4C_{Ra}}{\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n \exp\left(-\left(\frac{(2n+1)^2\pi^2 D}{4a^2}+\lambda_{Rn}\right)t\right)}{(2n+1)\left[1+\left(\frac{4\lambda_{Rn}a^2}{(2n+1)^2\pi^2 D}\right)\right]} cos\frac{(2n+1)\pi z}{2a}$$

여기에서, C_{Rn}과 C_{Ra}는 Rn222와 Ra226 각각의 활성도를 나타낸다.

지하수내 라돈(Rn222) 방출은 균열대를 통하여 집중적으로 발생되는데 암석 매질의 공극과 확산 계수에 의하여 결정된다. 지각은 광역적인 응력 조건하에 놓이며 암석 매질의 팽창이 발생하게 되면 암석 매질의 표면적은 증가하게 되고 이를 통하여 균열이나 공극 사이의 물의 유동성을 증대시키게 된다. 이 작용들은 라돈의 근원암으로부터 방출되어 지하수를 매개체로 하여 지표로 노출되는 특성을 보이게 된다. 즉, 라돈 방출의 이상치는 지진 발생으로 인한 지반 균열의 작용으로 인한 현상이 된다.

Ra226는 확산/이온 교환에 의하여 암반에서 균열대의 풍화를 통하여 방출이 되며, Ra226이 Rn222로 붕괴되면서 지하수내에 포함되게 된다. 동일 암종내에서의 라돈의 농도는 지질특성이나 수문특성에 따라 영향을 받는다. 특히 시료 채취 우물의 깊이, 우물의 형태, 지하수의 산출성, 표토층의 특성, 표토층의 두께, 물의 이화학적 특성 등이 영향을 미칠 수 있는데, 라돈 농도는 우물의 깊이에 따라 약간의 증가를 보이고, 얕은 표토층으로 덮힌 낮은 지하수 산출성을 갖는 우물은 높은 산출성을 갖는 우물보다 라돈의 농도가 높게 나타나며, Na의 함량이 높을수록 라돈은 감소하는 것으로 알려져 있다.

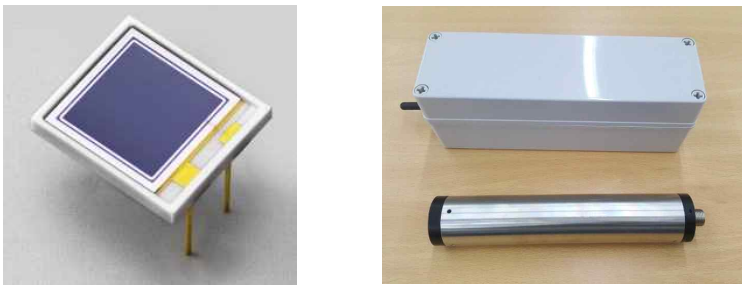
또한, 라돈의 고농도는 산화 조건의 Low TDS을 갖는 지하수에서 잘 나타나는 것으로 분석된 바 있는데, 이는 역으로 이와 같은 조건을 갖는 파쇄대내에서 Ra 흡착이 더 높음을 의미하거나 넓은 표면적을 갖는 산화성의 파쇄대가 Ra 확산을 잘 일으키는 것으로 평가되기도 한다. 동일한 모암 조건이라면 라돈의 방출은 단열의 성상에 의하여 차이가 존재하게 된다. 다수의 팽창성 균열을 갖는 지반에서 균열 주변에서 측정된 Ra226의 농도 분포를 보면, 균열의 개구성(openness)과 균열의 분포 밀도에 의하여 농도가 차이가 발생하게 되어 지진과 같은 지반 균열의 발생시 라돈 농도의 증가에 대한 가능성을 설명할 수 있다. 이와 같은 지반내에서의 라돈 방출은 파쇄대를 통하여 지하수를 매개체로 이루어지는 것이 일반적으로 알려져 있다.

○ 라돈 계측 장치

지하수내에서의 라돈은 물의 pH, 온도, 압력, 산화-환원 전위차 및 물의 흐름 속도 등에 의하여 녹는 양이 달라진다고 알려져 있으며, 이 중에서 압력에 의한 변화가 가장 크며 지하 깊은 곳에서 높은 압력하에 있던 지하수가 밖으로 분출될 때 많은 양의 라돈(Rn222)이 나오게 된다.

방사성 물질이 반감기가 되어 붕괴할 때 알파입자와 베타입자가 원자핵으로부터 발출되는데 방출시 알파입자와 베타입자가 갖는 에너지는 서로 다르기 때문에 라돈의 경우에도 예외는 아니어서 붕괴시 방출하는 베타 입자의 방출 수량을 카운트함으로써 에너지 측정이 가능하다.

본 연구에서는 지하수 내 라돈 측정을 위하여 반도체 방식을 적용, 붕괴시 발생된 입자가 PIN 포토다이오드에 입사했을 때 발생하는 반응을 카운트 하는 원리를 이용하였다(그림 3.11.2, Kim and Lim, 2017).

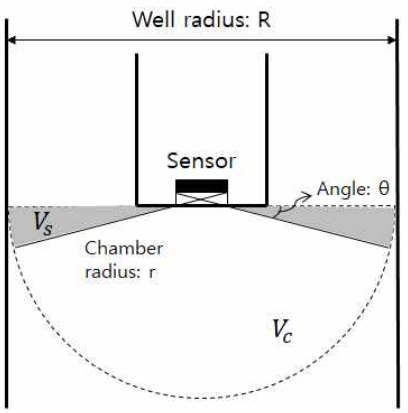


a) PIN photodiode　　b) 라돈 측정 센서 및 Logger

[그림 3.11.2] PIN photodiode와 라돈 센서

PIN-photodiode에 검출되는 베타입자의 포집을 위하여 라돈 선원내에서 일정 시간 동안 발생된 라돈 가스는 포집기로 유입된다는 가정 하에 센서 하부에 가상의 포집 공간을 설정하였으며, 이 포집기의 체적을 고려하여 일정시간 동안 포집되는 베타입자의 수를 산정하였다(그림 3.11.3).

기존 연구에 의하면, 본 라돈 계측기를 활용한 지하수내 베타입자의 카운팅은 20~30 분 정도의 연속 측정으로도 대표 농도를 파악할 수 있는 수준으로 평가된 바 있으며, 현장 자동 측정값과 채취 시료에 대한 실내 분석(액체섬광계수기)에서의 상관관계는 약 89%의 설명력을 갖는 것으로 평가된 바 있다.



[그림 3.11.3] 라돈 센서의 가상챔버

○ 라돈 시계열 특성 분석

라돈계측은 경주, 포항, 울산 지역의 6개 지하수 관측정에 상기의 자동 계측기를 설치하여 2017년 8월부터 2018년 10월까지 라돈 β입자 계측을 실시하였다. 실제 라돈 계측은 5 분 간격으로 실시되었으며 이를 토대로 1시간 동안의 누적량을 시계열로 도시하였으며 경향성을 파악하기 위하여 24시간 이동 평균을 함께 도시하였다(그림 3.11.4).

W1B의 라돈 베타입자 방출수를 24시간 이동 평균 자료로 분석해 보면, 포항 지진이 발생하였던 2017년 11월 15일 이전에 약간의 상승이 있었으며, 이후 순간적인 상승과 하강이 연속되었음을 알 수 있다.

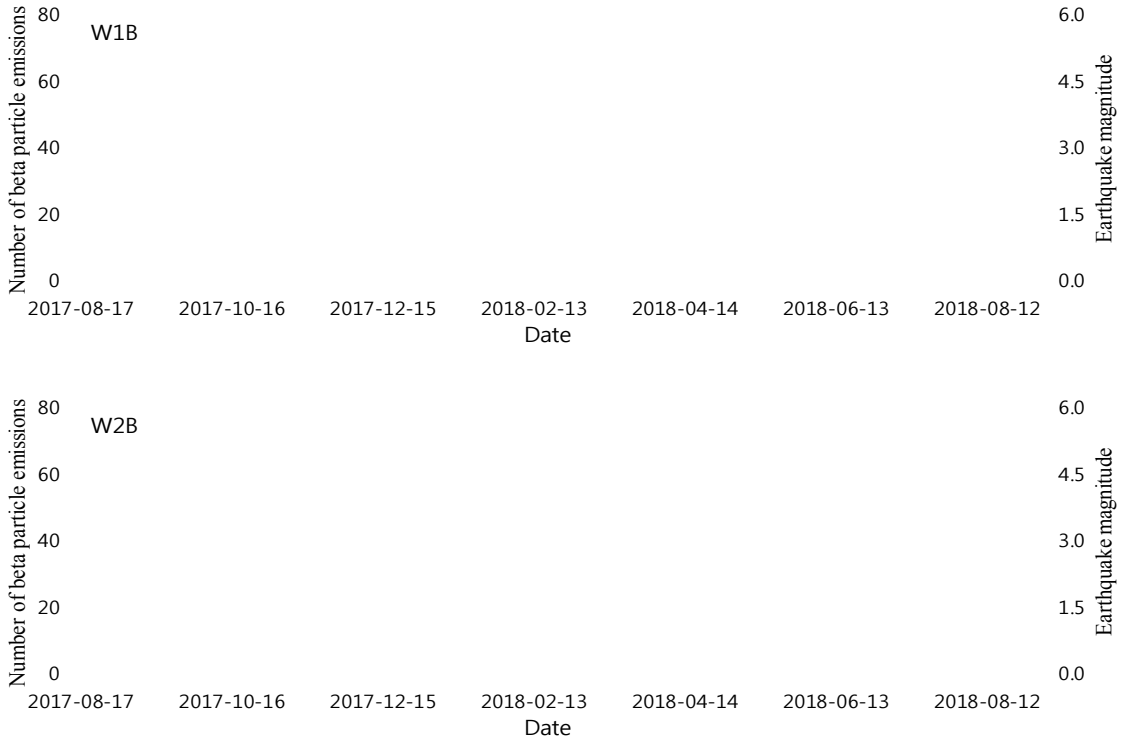
W2B에서는 보다 뚜렷한 라돈 변화가 인지되었는데, 포항 지진이 발생한 시점에 라돈의 급격한 상승이 나타났으며 이후 수개월 이상 높은 농도값이 유지되는 특성이 나타났다. W2B의 경우 지하수위의 변화도 상대적으로 잘 나타나는 관측정으로서 지진에 의한 지하수내 라돈의 농도와 지하수의 수위 변화가 상관성을 갖는 것으로 평가된다. 이는 지하수내 라돈의 방출이 지각내 파쇄대내에서의 응력 변화시 모암으로부터 방출되어 나오는 때문으로 보이며 W2B의 경우에는 진앙지와 원거리에 위치하고 있지만 포항 지진시 지하수위 변동이 비교적 크게 나타났으며 이로 인하여 하부 파쇄대내를 통한 라돈의 방출도 병행된 것으로 파악된다. 한편, 관측정내 자연적인 라돈의 배출은 액체상내에서의 기체상의 유동과 관련되는 것으로서 추가 연구를 통하여 라돈의 방출 심도와 라돈이 감지되는 센서 심도와의 관계 및 이동 속도 등을 규명한다면 라돈의 방출 시점이 정확히 평가될 수 있을 것이다.

W8B의 경우, 포항 본진 시점에서의 데이터는 확보되지 못하였으나, 2018년 2월 28일의 주요 여진이 발생하였을 당시에 여진 발생 이전 2~3 주 이전에 약간의 상승이 있었으며, 여진 발생 직후에는 다소 감소하는 경향을 보여주고 있다.

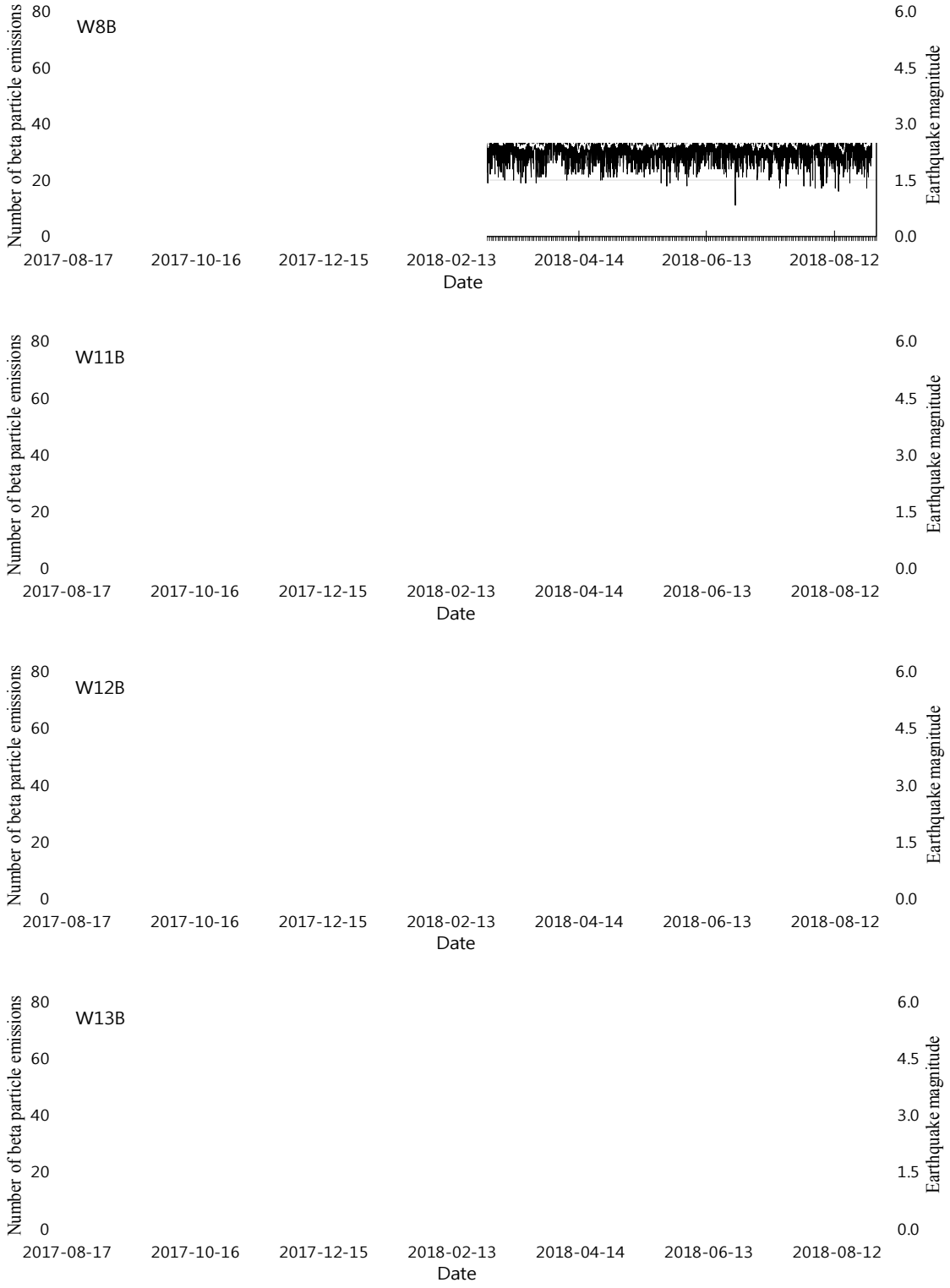
W11B의 경우에도 포항 본진의 자료는 확보되지 못하였으나, 2월 28일 여진시 약간의 변동이 감지된 것으로 평가되나 명확하진 않다. W12B에서는 포항 본진 이후 라돈 농도가 지속적으로 상승하였음을 알 수 있으며 2월 28일 여진 이후 라돈 농도가 감소한 것을 볼 수 있다. 전체적으로 포항 본진 이후 수개월간 상대적으로 높은 라돈 농도를 보이고 있다. W13B의 경우에는 지진에 의한 뚜렷한 차이를 보이진 않고 있다.

이와 같은 지하수내 라돈의 자동 측정을 통한 라돈 방출의 시계열적 변화를 분석한 결과, 지진 발생시 라돈의 변화가 발생한다는 점을 인지할 수 있었으며, 라돈 변화가 발생된 시점은 관측정에 따라서 지진 동시기적 또는 이전 또는 이후에 나타남을 알 수 있다. 기존 연구에서 지진 발생 이전에 라돈의 변화가 나타났다는 다수의 연구가 존재하고 있으나, 금회 연구에서는 이와 같은 결과가 뚜렷하게 도출되지 못한 점은 다음과 같이 정리될 수 있으나, 이를 보완한다면 지진 발생에 대한 전조 증상으로서 라돈의 농도 변화를 감지할 능력을 배가할 수 있을 것이다.

본 연구에서 사용된 라돈 자동 측정 장치는 라돈 센서의 한계상 높은 압력에서 견디지 못하는 시스템으로서 얕은 심도에 설치가 되었다는 한계를 갖고 있다. 따라서, 100 m 이상의 수압에서 견딜 수 있는 센서의 확보가 병행될 필요가 있겠다. 본 연구에서는 국내 최초로 지하수내 라돈의 자동 관측 기법을 현장에 적용한 것으로서, 예측 가능성에 대한 추가 연구를 통하여 원격으로 자동 관측되는 시스템을 도입, 지진의 평가 시스템을 개발한다면 보다 유용하게 활용이 될 것으로 본다.



[그림 3.11.4] 지하수내 라돈 베타입자의 시계열 변화 및 24시간 이동 평균 (가운데 하얀색 선) (open circle은 M>3.0 대표 지진)

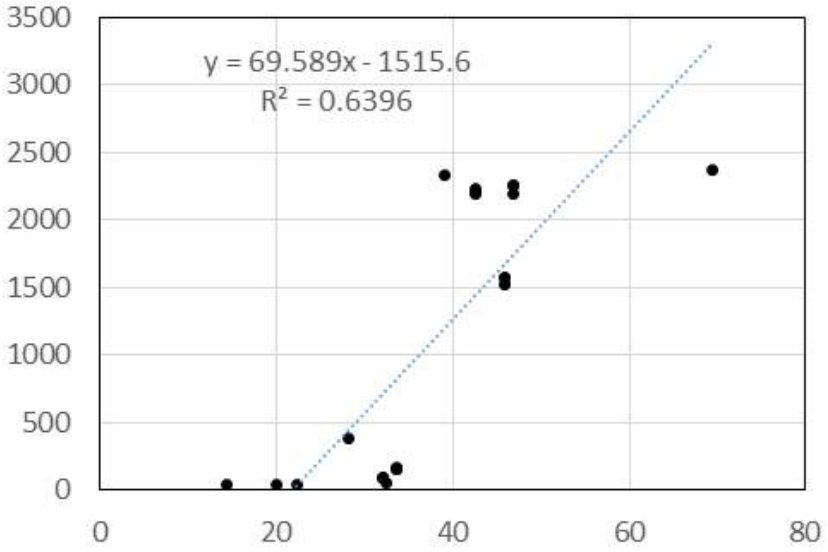


[그림 3.11.4] 지하수내 라돈 베타입자의 시계열 변화 및 24시간 이동 평균 (가운데 하얀색 선) (open circle은 M>3.0 대표 지진) (계속)

자동 관측으로부터 취득된 라돈의 베타입자 카운트수와 시료 채취 및 실내 분석에 의하여 분석된 라돈 농도(pCi/L)의 관계를 도시해 보았다(그림 3.11.5). 각 시료 채취 시점에서의 24시간 이동 평균값의 1시간당 평균값을 가로축으로 하고 세로축은 실내 분석에서 얻어진 라돈 농도를 나타냈었다.

두 인자간의 관계는 1차 회귀식으로 개략적으로 도시되었으며, 이로부터 추정되는 각 관측정별 라돈의 평균 농도는 다음과 같다.

- W1B: 15 ~ 502 pCi/L
- W2B: 920 ~ 1755 pCi/L
- W8B: 평균 711 pCi/L
- W11B: 평균 850 pCi/L
- W12B: 433 pCi/L 이하
- W13B: 평균 1,198 pCi/L



[그림 3.11.5] 자동 계측에 의한 라돈 베타입자수(x 축)와 실내 분석 결과(y 축, pCi/L) 산점도

이 결과를 토대로 보면, W2B가 가장 높은 범위의 값을 보이는데, 이는 W2B 관측지점의 지질이 타 지역과 달리 화성암류에 위치하고 있어 자연적인 라돈 방출량이 높기 때문이며, W1B는 화산암이 고기 화산암이 기반암이며, W8B, W11B, W12B 지역은 퇴적암류가 기반암으로써 상대적인 방출이 낮기 때문이다.

이와 같은 기반암의 종류별로 라돈의 절대 방출량의 차이는 라돈의 기원이 우라늄으로 부터 붕괴되기 때문이며 이는 심성암에서 주로 포함하게 된다. 따라서, 지하수 라돈을 활용한 라돈 변화의 관측을 위해서는 태생적으로 라돈 방출량이 큰 지점에 설치하는 것이 바람직할 것이다. 이는, 라돈 방출량이 큰 기반암 지역에서 설치함으로써 단층 파쇄 압축에 의한 지하수의 이동을 용이하게 하고 포함된 라돈의 유동성을 높일 수 있기 때문이다.

12. 이화학 특성 변화

○ 지하수내 이화학 특성

지하수내 이온은 장기간의 암석과 물의 반응에 의한 결과물로서 나타난다. 지진이 발생하는 경우 심부 파쇄대내의 장기간 체류하고 있는 지하수가 배출되면서 관정내의 수질에 변화를 발생시킨다.

이와 같은 지하수내의 이화학 성분은 지진 전과 이후에 변화하게 되며 자동 연속 측정되는 데이터(전기전도도 등)에 의하여 일차적으로 인지될 수 있으며, 정기적인 수질 분석을 통하여 비교 분석될 수 있다(표 3.12.1).

본 연구에서는 연구지역내 설치된 지하수 관측정에서 지하수 시료를 채취하여 이화학 분석 및 동위원소 분석을 실시하여 지진 이후의 변화를 분석하고자 하였다.

○ 관측소별 이화학 특성 변화

기존 연구에 의하면, 1995년 규모 7.2의 일본 고베지진 당시 진원지 부근에 있는 2개의 우물에서 염소이온과 황산염 이온의 농도가 급변한 사례가 있는 등 지진시 지하수 수질의 변화가 발생한 바 있다. 일본의 분석결과에 따르면 염소이온과 황산염이온은 1994년 8월부터 지진 직전까지 꾸준히 증가하였고, 지진 이후에는 훨씬 높은 농도를 보인 것으로 연구되었다(Tsunogai and Wakita, 1995). 이러한 기존 연구 사례를 바탕으로 연구결과를 비교·검토하였다.

가) W1B 관측소

관측소에서 2017년 12월 25일 지진 이후 2017년 12월 27일 현장측정 결과에서 pH, EC, DO 항목이 증가했다가 감소하는 경향을 보인다. 이 시기에 관측소와 가장 가까운 강우관측소 강우 결과 시료채취 3일 전인 24일 누적강수량 12 mm로 확인되었지만, 그 양이 지하수의 화학적인 특성을 변화시켰다고 볼 수는 없을 것이라고 판단하였다. 특히 전기전도도 측정결과와 이온 분석결과를 비교하였을 때 이온농도의 변화가 크게 나타나지 않은 것으로 보아 측정기기 오차로 인한 변화로 판단된다. 2018년 2월 22일 시료채취 시점을 기준으로 36일전부터 무강우를 기록하였으며, 이 시기에 2018년 2월 11일 규모 4.6 여진 발생 이후로 14회 여진이 추가로 발생하였다. 이 시기의 현장측정 결과 pH, EC가 증가하였으며, 이는 지진에 의한 영향으로 판단된다(그림 3.12.1).

W1B관측소의 이온분석결과 포항 지진 이전의 분석결과가 없어 초기 분석결과를 비교할 수 없었다. 2018년 2월 22일 이온 분석결과를 기준으로 전후 시점을 비교하였다. 2018년 2월 11일 규모 4.6의 여진 발생이후 시료채취 이전까지 규모 2.0 이상의 여진이 14회 발생하였다. 이로 인해 Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-} 이온은 증가하는 경향을 보였으며, NO_3^{-}이온은 감소하는 경향을 보인다. Cl^{-}, SO_4^{2-} 이온은 포항지진(본진) 직후 측정된 결과와 비교하였을 때, 초기 분석결과에 비해 높아진 농도값이 유지되는 특성을 보인다. 반면 K^{+}이온은 초기 분석결과에 비해 낮아진 농도값이 유지되는 특성이 나타난다(표 3.12.1).

시료채취 이전 무강우 일수가 36일 정도 지속되었고, 화학특성을 변화시킬 외부 요인은 없었다고 판단되어 이러한 이온농도들의 변화는 지진에 의한 변화로 보인다.

나) W2B 관측소

W2B 관측소의 현장측정 결과 pH가 포항지진이후 증가한 상태로 유지되는 경향을 보이고 있다(그림 3.12.2). 포항 지진이후 강수량이 많지 않아 강우에 의한 영향은 미미한 것으로 보이며, 이 변화는 지진에 의한 영향으로 보인다.

계측기를 이용한 라돈 관측에서 가장 뚜렷한 변화를 보였던 W2B 관측소의 라돈 분석 결과는 포항 지진 직후 초기 분석값보다 낮은 농도를 보이다가 2018년 2월 11일 규모 4.6 지진 이후 직전 분석결과보다 높은 농도값을 보인다(표 3.12.1).

W2B 관측소의 이온분석결과 Na^+, K^+, Ca^{2+}, Cl^-, HCO_3^- 이온들의 변화가 관측되었다(표 3.12.1). Na^+, HCO_3^-이온은 2017년 12월 25일 발생한 지진 이후 2017년 12월 27일 분석 결과에서 감소하였다가 증가하여 일정 농도에서 유지되는 경향을 보인다. K^+이온은 포항 지진 이후 증가하였다가 감소하였으며, 그 이후 발생한 지진에 의한 변화는 나타나지 않았다. Cl^- 이온은 포항지진 이후 지속적인 증가추세(약 1.5개월)를 보이다 증가된 상태로 유지되는 경향을 보인다. 이러한 변화는 강우에 의한 영향보다는 지진에 의한 영향이 더 큰 것으로 보인다.

다) W8B 관측소

W8B 관측소 현장 측정 결과 pH가 증감현상을 보이지만 평균값에서 크게 벗어나지 않아 지진의 영향이라고 판단하기 어렵다. 또한 EC는 포항지진 이후 증가하였다가 초기 측정값과 유사한 값으로 유지되고 있지만, 주요 이온들의 농도변화를 찾기 어려워 지진에 의한 증가보다는 측정기기 오차로 판단된다.

라돈 농도는 포항지진 직후 2017년 11월 17일 분석결과에는 검출되지 않았으나 2017년 11월 30일 분석결과에서 22~27 pCi/L의 범위로 미량의 라돈이 검출되었다. 그러나 2017년 12월 25일 지진 이후 분석된 결과에서 150~200 pCi/L의 범위로 약 60~70배 정도 증가하는 경향을 보인다. 그 이후 조금씩 감소되긴 하지만 60~170 pCi/L의 범위로 초기 값에 비해 높은 농도로 검출되고 있다.

이온분석결과 Na^+, Ca^{2+}, HCO_3^- 이온은 분석시기에 따라 증가 감소를 반복하는 특징을 보이고 있으며, 이는 지진에 의한 영향보다는 다른 요인에 의한 현상으로 보인다. Cl^- 이온은 4월 이후 증가하는 경향을 보이고, SO_4^{2-} 이온은 꾸준히 증가되는 경향을 보인다. 다른 관측소에서 지진에 의한 영향으로 Cl^-, SO_4^{2-} 이온들의 변화 특성을 보였지만, 상대적으로 진앙지와 거리가 먼 W8B 관측소에서는 지진에 의한 영향보다는 다른 외부 요인에 의한 변화로 판단된다.

라) W11B 관측소

W11B 관측소 현장 측정 결과 pH가 증가하는 현상이 나타나고, EC는 2017년 12월 25일 지진 이후 증가하였다가 초기 측정값과 유사한 값으로 유지되고 있지만, 주요 이온들의 농도 변화를 찾기 어려워 지진에 의한 증가보다는 측정기기 오차로 판단된다(그림 3.12.4).

라돈의 경우 2017년 11월 17일 이후 꾸준한 증가 추세를 보이고 있다. 이는 관측소가 진앙지랑 가장 가까운 곳에 위치하고 있으며, 추가로 발생하고 있는 여진들의 영향으로 꾸준한 증가추세를 보이는 것으로 판단된다. 그러나 2018년 4월 이후 여진이 많지 않음에도 꾸준한 증가추세를 보이는 것은 강우에 의한 영향이 복합적으로 나타나는 것으로 보인다.

주요이온 분석 결과 Na^+, HCO_3^- 이온은 2017년 12월 25일 지진 이후 감소했다가 원래 농도값을 회복하는 경향을 보이고, Cl^-이온은 포항지진(본진) 이후 증가한 상태를 유지하고 있다. Ca^{2+} 이온은 4월 이후 감소하는 것으로 보아 지진의 의한 변화보다는 강우에 의한 영향이 더 큰 것으로 보인다. SO_4^{2-}이온은 증감현상을 보이긴 하지만 그 범위가 평균치를 벗어나지 않는 것으로 확인되었다.

마) W12B 관측소

W12B 관측소 현장측정 결과 pH가 증가하는 경향을 보이고 있으며, EC는 2017년 12월 27일 현장 조사 때만 증가한 것으로 보아 앞서 기술한 바와 같이 측정기기 오차로 보인다. 다른 항목에서는 특이한 변화 양상은 보이지 않았다(그림 3.12.5).

라돈의 경우 60 m 지점에서 채취한 시료에서만 증감 현상을 보이고 있지만, 지진의 영향보다는 관측소의 위치가 형산강에 인접해 있고, 동해와도 가까워 조석과 하천의 영향이 더 크게 작용하는 것으로 판단된다.

주요이온 분석결과 시료채취 시기에 따라 증감현상을 보이지만, 앞서 기술된 다른 관측소의 특징은 보이지 않아 지진의 영향보다는 다른 외부 요인에 의한 변화로 판단된다.

바) W13B 관측소

W13B 관측소 현장측정 결과 EC가 포항 지진 이후 2017년 11월 17일에 측정된 결과보다 2017년 11월 30일 측정된 결과에서 약 250 μS/cm 감소했다가 이후에 증가하여 유지되는 경향을 보인다(그림 3.12.6).

라돈의 경우 포항 지진과 많은 여진이 있었던 2017년 11월부터 2018년 2월 사이에는 약간의 증가현상을 있었지만, 2018년 4월 이후 증가했다가 감소하는 경향을 보인다. 이 영향은 지진에 의한 현상보다는 강우에 의한 일시적인 증가로 보인다.

주요이온 분석결과 Na^+, Cl^- 이온은 포항 지진 직후 증가하였다가 증가된 농도가 유지되는 경향을 보인다. Ca^{2+}, Mg^{2+} 이온은 포항지진 직후 증감현상을 보이지만 평균적인 농도는 지속적으로 증가 추세를 보이고, SO_4^{2-} 이온은 포항 지진 이후 지속적인 증가현상을 보인다.

아) 종합

6개 관측소의 현장측정, 라돈 분석, 주요이온 분석결과를 종합하면, 지진에 의한 영향으로 pH, EC 등 변화가 감지되었다. 채취 시료를 활용한 라돈 분석의 경우에는 지진에 의한 변동성을 파악하는 것이 쉽지 않으나, 일부 관측정에서 포항 본진 이후 높은 특성을 보이고 있다. 주요이온 분석결과 기존 연구 결과에서도 언급되었듯이 염소이온, 황산염이온 등의 농도 변화가 감지되었으며, 이외에도 Na, K, Ca 등의 이온 변화도 파악하였다.

포항 지진 직후인 11월 17일의 지하수 이온 분석 결과와 이후의 결과를 주성분 분석 자료에 기반하여 비교해 보면, 11월 17일의 주성분 분석에서는 본진 이후 일정 상당 기간이 경과한 시점의 결과와 상이함을 알 수 있다(그림 3.12.7). 포항 본진 이후 일정 기간이 경과한 이후에는 주성분 1과 2에 의하여 지배되는 양이온, 음이온의 그룹이 큰 변화가 없이 분포함을 알 수 있다. 그림에서 보면, F, K, SO_4, HCO_3, Cl, Na와 Ca, NO_3, Mg, SiO_2가 다른 위치에 도시되어 있으나, 본직 직후의 자료에서는 이와 같은 그룹이 흐트려져서 나타남을 알 수 있다. Na, F 및 Cl이 유사한 위치에 존재하고 나머지 항목들이 하나의 그룹을 형성하고 있다. 이와 같은 차이는 본진시 파쇄대를 통하여 지진 응력에 의하여 보다 관정으로부터 먼 지점에 위치하고 있던 지하수가 순간적으로 배출되면서 주변 지층내의 지하수 성분으로 변화되는 것으로 보인다.

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과

Sample no.	Sampling date	Sampling Depth	Temp. (℃)	pH	ORP (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	Rn (pCi/L)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
W1B	2017-11-17	3.85	14.0	6.77	269.0	505	3.50	28	-7.50	-37.0
W1B-1	2017-12-01	4	13.2	6.97	208.0	438	1.63	38	-4.60	-31.0
W1B-2	2017-12-01	30	12.0	7.01	147.0	434	2.03	37	-4.30	-30.0
W1B-3	2017-12-01	60	11.7	7.01	218.0	450	2.63	46	-4.90	-35.0
W1B-1	2017-12-27	4.05	11.4	7.48	108.5	643	7.01	20	-	-
W1B-2	2017-12-27	30	12.2	7.32	-38.5	714	1.43	20	-	-
W1B-3	2017-12-27	60	12.0	7.35	43.2	706	4.48	30	-	-
W1B-1	2018-02-22	4.11	12.1	7.71	-12.8	549	1.09	20	-7.44	-46.6
W1B-2	2018-02-22	30	11.8	7.64	-13.5	549	1.23	20	-7.46	-47.6
W1B-3	2018-02-22	60	12.6	7.56	8.9	550	0.95	40	-7.47	-47.7
W1B-1	2018-04-18	3.89	15.5	7.15	265.5	475	3.06	20	-	-
W1B-2	2018-04-18	30	16.0	7.13	287.1	468	3.73	30	-	-
W1B-3	2018-04-18	60	15.8	7.13	285.5	464	3.65	40	-	-
W1B-1	2018-06-25	4.15	17.2	7.56	69.2	515	5.74	80	-	-
W1B-2	2018-06-25	30	17.2	7.12	83.6	509	4.46	80	-	-
W1B-3	2018-06-25	60	17.7	7.14	130.3	505	4.61	80	-	-

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

Sample no.	Sampling date	Concentration (mg/L)									
		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SiO_2	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	F^-	HCO_3^-
W1B	2017-11-17	14.20	11.80	58.00	23.60	30.60	15.20	46.00	33.70	<0.10	213.57
W1B-1	2017-12-01	15.04	6.66	63.02	24.77	16.22	18.06	48.16	36.18	0.13	218.15
W1B-2	2017-12-01	14.86	6.63	62.68	24.63	16.51	17.80	47.58	35.86	0.32	213.57
W1B-3	2017-12-01	15.17	6.72	63.18	24.87	16.46	19.00	48.02	36.04	0.17	213.57
W1B-1	2017-12-27	12.80	7.99	60.13	25.45	16.73	17.79	54.57	38.50	0.00	201.37
W1B-2	2017-12-27	12.64	8.05	61.26	25.01	16.53	18.20	50.09	38.35	0.00	208.99
W1B-3	2017-12-27	12.80	8.05	60.71	25.49	16.78	18.01	50.94	39.66	0.00	210.52
W1B-1	2018-02-22	16.30	9.01	64.50	27.20	16.70	18.32	51.70	33.77	0.00	215.10
W1B-2	2018-02-22	15.90	8.40	62.20	26.30	15.60	17.79	51.46	33.23	0.00	213.57
W1B-3	2018-02-22	15.60	8.35	61.50	26.10	15.50	17.17	51.45	32.44	0.00	215.10
W1B-1	2018-04-18	13.57	7.55	53.29	22.35	14.58	17.11	49.82	35.51	0.00	178.48
W1B-2	2018-04-18	13.88	7.51	53.57	22.33	14.83	17.42	50.54	35.94	0.00	183.06
W1B-3	2018-04-18	13.83	7.47	53.34	21.93	14.83	17.67	50.45	36.00	0.00	178.48
W1B-1	2018-06-25	14.70	7.86	52.65	24.18	15.00	17.11	52.19	37.03	-	105.26
W1B-2	2018-06-25	14.88	7.77	54.64	23.92	14.93	17.19	52.06	37.01	-	103.73
W1B-3	2018-06-25	14.95	7.86	53.63	24.14	15.26	17.53	52.73	37.33	-	99.16

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

Sample no.	Sampling date	Sampling Depth	Temp. (℃)	pH	ORP (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	Rn (pCi/L)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
W2B	2017-11-17	2.07	14.0	6.81	247.0	128	1.15	2,341	-9.30	-52.0
W2B-1	2017-11-30	2.1	12.6	6.96	215.0	137	2.48	2262	-9.30	-50.0
W2B-2	2017-11-30	30	11.9	6.06	168.0	122	2.04	2266	-9.00	-50.0
W2B-3	2017-11-30	60	12.3	5.78	208.0	122	3.49	2193	-8.60	-46.0
W2B-1	2017-12-27	2.28	9.8	8.33	37.9	202	7.92	1530	-	-
W2B-2	2017-12-27	30	11.4	8.36	7.8	203	3.49	1580	-	-
W2B-3	2017-12-27	60	11.6	8.29	31.4	187	4.88	1580	-	-
W2B-1	2018-02-22	2.45	9.7	8.52	25.8	154	1.79	2200	-9.14	-61.0
W2B-2	2018-02-22	30	8.6	8.50	39.0	157	1.42	2210	-9.18	-61.5
W2B-3	2018-02-22	60	9.5	8.43	55.0	153	2.12	2230	-9.22	-60.2
W2B-1	2018-04-18	2.20	14.5	8.09	231.7	139	1.93	1690	-	-
W2B-2	2018-04-18	30	14.9	8.03	239.6	140	2.19	1560	-	-
W2B-3	2018-04-18	60	14.8	8.05	229.1	139	2.73	1660	-	-
W2B-1	2018-06-25	2.50	18.0	8.11	42.7	151	8.23	1020	-	-
W2B-2	2018-06-25	30	19.1	6.66	125.4	421	5.61	40	-	-
W2B-3	2018-06-25	60	17.9	8.34	48.3	195	5.33	2350	-	-

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

Sample no.	Sampling date	Concentration (mg/L)									
		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SiO_2	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	F^-	HCO_3^-
W2B	2017-11-17	17.80	0.33	12.60	1.87	26.20	3.25	15.30	0.27	0.34	67.12
W2B-1	2017-11-30	18.33	0.88	13.21	1.83	12.88	3.47	15.41	0.00	0.33	64.07
W2B-2	2017-11-30	18.33	0.89	13.14	1.81	12.95	3.52	15.24	0.04	0.34	68.65
W2B-3	2017-11-30	18.25	1.08	13.14	1.80	12.89	3.73	15.16	0.06	0.39	70.17
W2B-1	2017-12-27	14.73	0.52	12.33	1.83	12.91	3.57	15.55	0.00	0.44	59.49
W2B-2	2017-12-27	14.53	0.68	12.44	1.84	12.75	3.77	15.35	0.00	0.48	61.02
W2B-3	2017-12-27	14.75	0.63	12.41	1.78	12.68	3.71	15.13	0.00	0.49	61.02
W2B-1	2018-02-22	18.60	0.27	13.60	2.05	12.50	3.61	14.74	0.09	0.38	70.17
W2B-2	2018-02-22	18.50	0.35	14.10	2.21	12.60	3.69	14.97	0.09	0.37	68.65
W2B-3	2018-02-22	18.50	0.25	13.60	2.02	12.50	3.57	14.72	0.00	0.39	65.60
W2B-1	2018-04-18	17.81	0.34	11.83	1.70	13.60	3.57	15.34	0.15	0.43	70.17
W2B-2	2018-04-18	17.53	0.35	11.53	1.66	13.39	3.67	15.48	0.00	0.43	67.12
W2B-3	2018-04-18	17.65	0.32	10.92	1.58	13.30	3.54	15.36	0.02	0.43	68.65
W2B-1	2018-06-25	18.76	0.42	12.73	1.82	12.93	3.57	14.10	0.64	0.37	73.22
W2B-2	2018-06-25	19.85	6.83	49.15	11.45	7.16	21.45	9.59	20.49	0.45	70.17
W2B-3	2018-06-25	19.06	0.64	12.96	1.86	13.17	3.64	15.23	0.31	0.41	71.70

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

Sample no.	Sampling date	Sampling Depth	Temp. (℃)	pH	ORP (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	Rn (pCi/L)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
W8B	2017-11-17	4.75	17.5	7.76	221.0	121	4.19	-	-6.40	-33.0
W8B-1	2017-11-30	4.1	16.2	7.60	195.0	176	4.08	-	-6.30	-32.0
W8B-2	2017-11-30	30	15.3	6.53	218.0	94	3.95	22	-6.50	-33.0
W8B-3	2017-11-30	60	14.6	6.47	220.0	97	4.06	27	-6.60	-32.0
W8B-1	2017-12-27	4.05	11.2	7.32	124.8	172	7.43	200	-	-
W8B-2	2017-12-27	30	11.9	7.01	109.3	159	7.84	210	-	-
W8B-3	2017-12-27	60	12.4	6.97	98.0	150	7.81	150	-	-
W8B-1	2018-02-22	4.05	12.7	7.16	88.1	110	3.67	160	-7.12	-46.0
W8B-2	2018-02-22	30	12.4	7.00	76.9	111	3.80	170	-7.18	-46.5
W8B-3	2018-02-22	60	11.3	6.98	93.6	110	4.08	160	-7.23	-46.0
W8B-1	2018-04-18	3.75	15.5	6.52	260.5	115	5.57	100	-	-
W8B-2	2018-04-18	30	15.6	6.58	269.5	103	5.37	100	-	-
W8B-3	2018-04-18	60	15.9	6.51	258.6	103	5.58	100	-	-
W8B-1	2018-06-26	4.00	17.0	7.34	104.1	111	7.60	60	-	-
W8B-2	2018-06-26	30	16.0	7.04	101.5	111	6.35	120	-	-
W8B-3	2018-06-26	60	17.1	6.56	119.4	110	6.51	110	-	-

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

Sample no.	Sampling date	Concentration (mg/L)									
		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SiO_2	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	F^-	HCO_3^-
W8B	2017-11-17	11.20	0.72	7.86	2.43	20.40	5.28	6.89	1.87	<0.10	54.92
W8B-1	2017-11-30	11.80	1.10	8.38	2.36	10.46	5.67	6.85	1.52	0.07	48.82
W8B-2	2017-11-30	11.84	1.08	8.40	2.36	10.32	5.61	6.86	1.73	0.06	57.97
W8B-3	2017-11-30	11.62	1.09	8.50	2.42	10.56	5.64	6.73	1.68	0.06	48.82
W8B-1	2017-12-27	9.36	0.84	6.72	2.60	9.45	5.32	8.00	1.66	0.19	39.66
W8B-2	2017-12-27	9.71	0.99	6.74	2.60	9.38	5.61	8.00	1.48	0.17	36.61
W8B-3	2017-12-27	9.35	0.91	6.64	2.58	9.37	5.29	7.79	1.76	0.16	33.56
W8B-1	2018-02-22	12.30	0.79	8.43	2.69	9.13	5.19	8.22	2.11	0.00	45.77
W8B-2	2018-02-22	12.40	0.75	8.88	2.68	9.23	5.13	8.27	2.16	0.00	45.77
W8B-3	2018-02-22	12.10	0.77	8.65	2.72	9.24	5.17	8.06	2.22	0.00	44.24
W8B-1	2018-04-18	9.53	0.64	7.44	2.22	8.51	6.16	9.26	3.59	0.13	39.66
W8B-2	2018-04-18	9.36	0.62	7.37	2.23	8.58	6.18	9.27	3.48	0.14	36.61
W8B-3	2018-04-18	9.57	0.61	7.32	2.20	8.85	6.16	9.22	3.58	0.00	38.14
W8B-1	2018-06-26	11.69	0.67	8.07	2.42	9.23	6.13	10.26	2.14	-	45.77
W8B-2	2018-06-26	11.55	0.75	9.20	2.54	9.02	6.25	10.66	5.02	-	38.14
W8B-3	2018-06-26	11.30	0.73	8.49	2.43	9.05	6.16	10.30	3.68	-	38.14

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

Sample no.	Sampling date	Sampling Depth	Temp. (℃)	pH	ORP (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	Rn (pCi/L)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
W11B	2017-11-17	7.86	15.9	7.21	197.0	315	3.99	15.0	-7.70	-43.0
W11B-1	2017-12-01	8	12.6	7.23	1.0	308	4.16	18.0	-7.50	-59.0
W11B-2	2017-12-01	30	12.7	7.07	28.0	257	3.85	44.0	-7.90	-61.0
W11B-3	2017-12-01	60	12.9	7.18	58.0	248	3.81	50.0	-7.70	-60.0
W11B-1	2017-12-26	8.04	10.2	8.46	7.0	409	3.21	9.2	-	-
W11B-2	2017-12-26	30	9.0	8.35	79.5	427	4.22	40.0	-	-
W11B-3	2017-12-26	60	12.0	8.20	82.1	407	6.78	30.0	-	-
W11B-1	2018-02-21	8.32	15.4	8.77	46.0	304	2.96	30.0	-7.93	-56.0
W11B-2	2018-02-21	30	14.5	8.44	14.4	304	2.58	40.0	-7.97	-55.8
W11B-3	2018-02-21	60	14.1	8.35	25.8	299	2.45	40.0	-7.94	-55.0
W11B-1	2018-04-19	7.61	17.1	7.70	82.7	289	3.70	40.0	-	-
W11B-2	2018-04-19	30	16.8	7.63	121.2	279	4.03	50.0	-	-
W11B-3	2018-04-19	60	16.7	7.64	140.5	273	4.14	60.0	-	-
W11B-1	2018-06-26	7.55	18.0	8.36	-71.9	308	5.62	90.0	-	-
W11B-2	2018-06-26	30	17.5	7.95	-30.4	308	4.46	100.0	-	-
W11B-3	2018-06-26	60	18.0	8.52	-1.7	303	6.52	80.0	-	-

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

Sample no.	Sampling date	Concentration (mg/L)									
		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SiO_2	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	F^-	HCO_3^-
W11B	2017-11-17	46.30	0.64	13.90	3.20	30.20	24.20	7.78	11.90	4.45	99.16
W11B-1	2017-12-01	49.61	0.95	13.97	2.82	11.33	26.71	7.62	12.57	4.22	99.16
W11B-2	2017-12-01	52.48	1.05	13.49	2.80	11.07	28.72	8.18	12.98	4.22	102.21
W11B-3	2017-12-01	52.38	0.96	12.61	2.62	10.70	27.02	7.64	13.04	4.36	100.68
W11B-1	2017-12-26	41.37	1.03	14.12	3.29	17.04	27.03	7.83	13.11	4.03	88.48
W11B-2	2017-12-26	41.70	0.83	14.69	3.40	17.26	27.00	8.34	13.07	4.21	90.00
W11B-3	2017-12-26	41.80	0.82	14.45	3.36	17.46	27.26	7.83	13.46	4.02	80.85
W11B-1	2018-02-21	49.00	0.59	14.90	3.40	15.90	25.67	7.36	11.83	4.03	99.16
W11B-2	2018-02-21	49.20	0.61	14.80	3.39	15.80	25.18	7.41	10.41	3.84	96.11
W11B-3	2018-02-21	49.00	0.55	15.00	3.43	16.10	25.64	7.38	10.60	3.95	94.58
W11B-1	2018-04-19	47.60	0.68	11.87	2.92	14.59	28.04	7.97	10.76	4.39	109.84
W11B-2	2018-04-19	50.24	0.68	11.92	2.90	13.96	27.46	7.92	10.56	4.34	99.16
W11B-3	2018-04-19	53.39	0.67	12.06	2.82	14.30	26.72	7.57	10.64	4.50	99.16
W11B-1	2018-06-26	49.31	0.83	13.62	3.23	15.73	26.18	7.51	9.00	3.93	105.26
W11B-2	2018-06-26	50.02	0.91	13.58	3.13	15.18	26.14	7.60	9.64	4.36	103.73
W11B-3	2018-06-26	49.37	0.79	13.81	3.17	15.41	25.77	7.62	8.82	4.33	99.16

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

Sample no.	Sampling date	Sampling Depth	Temp. (℃)	pH	ORP (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	Rn (pCi/L)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
W12B-1	2017-12-01	7.5	12.6	8.71	-276.0	1484	1.73	-	-7.70	-30.0
W12B-2	2017-12-01	30	13.2	8.68	-271.0	1471	2.11	-	-8.00	-61.0
W12B-3	2017-12-01	60	14.0	8.65	-257.0	1720	2.52	16.0	-7.90	-61.0
W12B-1	2017-12-26	10.55	13.2	9.04	-377.6	2338	7.56	<1.9	-	-
W12B-2	2017-12-26	30	13.8	9.04	-379.0	2237	3.66	<1.7	-	-
W12B-3	2017-12-26	60	13.9	9.02	-387.8	2222	2.21	<1.7	-	-
W12B-1	2018-02-22	10.26	15.0	9.14	-198.8	1921	0.6	2.1	-8.37	-56.3
W12B-2	2018-02-22	30	14.8	9.18	-306.3	1943	0.88	2.1	-8.30	-56.0
W12B-3	2018-02-22	60	14.6	9.21	-306.6	1938	0.72	<1.9	-8.33	-56.7
W12B-1	2018-04-19	7.02	17.2	8.94	-199.7	1814	2.19	<0.8	-	-
W12B-2	2018-04-19	30	16.6	8.97	-216.2	1806	1.53	0.9	-	-
W12B-3	2018-04-19	60	16.8	8.98	-220.2	1807	1.61	6.2	-	-
W12B-1	2018-06-26	7.60	17.5	9.89	-312.9	1676	3.86	<1.4	-	-
W12B-2	2018-06-26	30	18.5	9.81	-287.8	1636	3.68	<1.4	-	-
W12B-3	2018-06-26	60	18.6	9.87	-297.7	1645	2.97	<1.4	-	-

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

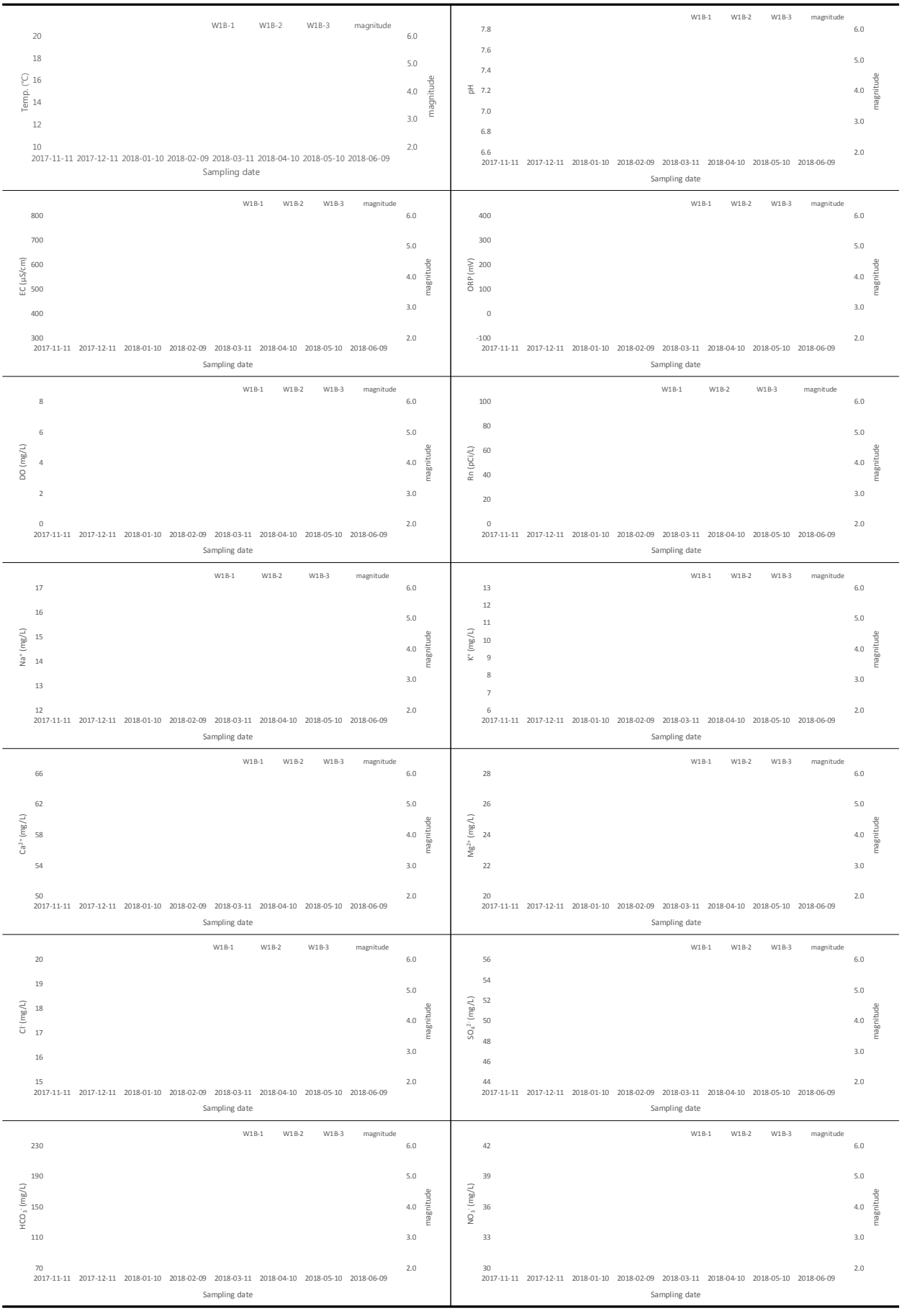
Sample no.	Sampling date	Concentration (mg/L)										
		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SiO_2	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	F^-	HCO_3^-	CO_3^{2-}
W12B-1	2017-12-01	439.3	13.61	9.02	13.31	4.34	224.8	122.0	0.00	2.53	628.5	25.50
W12B-2	2017-12-01	416.8	13.39	8.99	12.90	6.99	225.3	129.9	0.30	2.46	547.7	39.01
W12B-3	2017-12-01	474.0	11.48	8.63	10.85	4.78	303.6	121.9	0.79	3.38	570.5	49.51
W12B-1	2017-12-26	392.0	16.80	8.14	12.90	4.68	252.9	126.2	0.84	3.00	590.4	-
W12B-2	2017-12-26	381.8	12.07	8.28	13.14	4.73	243.0	135.0	0.56	3.86	585.8	-
W12B-3	2017-12-26	368.3	11.69	7.96	12.81	4.63	242.7	133.3	0.00	2.71	591.9	-
W12B-1	2018-02-22	422.0	11.20	8.26	12.50	4.61	245.0	123.2	1.06	3.03	582.7	18.00
W12B-2	2018-02-22	427.0	11.40	8.02	11.90	4.79	241.7	122.0	0.64	2.82	581.2	18.00
W12B-3	2018-02-22	435.0	11.50	8.18	12.40	4.64	240.8	121.4	0.33	2.75	591.9	19.50
W12B-1	2018-04-19	405.1	9.38	4.45	9.22	2.79	249.5	116.2	0.40	2.30	561.4	40.51
W12B-2	2018-04-19	388.1	9.00	3.56	8.41	2.62	253.5	118.4	0.22	2.38	549.2	39.01
W12B-3	2018-04-19	391.9	8.85	3.03	8.47	2.71	254.7	118.2	0.32	2.75	555.3	39.01
W12B-1	2018-06-26	451.5	14.10	5.23	7.55	3.19	288.7	92.9	3.11	1.60	436.3	57.01
W12B-2	2018-06-26	444.8	13.76	5.15	7.51	3.20	279.4	90.1	3.07	1.78	570.5	64.51
W12B-3	2018-06-26	433.2	13.77	5.04	7.54	3.16	281.8	91.7	2.94	2.08	567.5	66.01

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

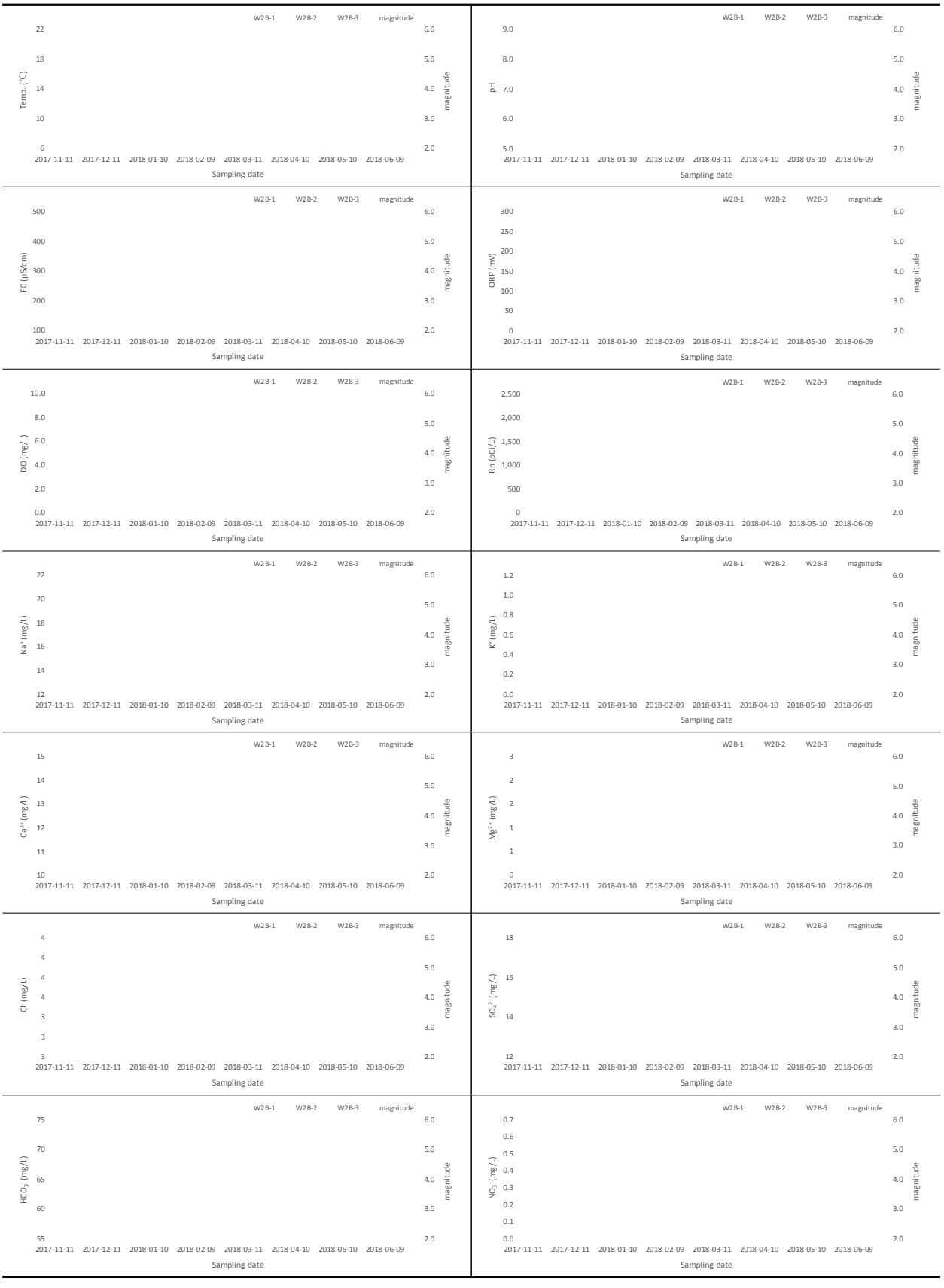
Sample no.	Sampling date	Sampling Depth	Temp. (℃)	pH	ORP (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	Rn (pCi/L)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
W13B	2017-11-17	3.55	16.3	6.83	196.0	529	3.37	-	-7.50	-42.0
W13B-1	2017-12-01	3.5	14.4	7.15	230.0	313	4.33	-	-5.80	-46.0
W13B-2	2017-12-01	20	14.3	7.08	232.0	317	3.28	-	-6.10	-48.0
W13B-3	2017-12-01	40	14.0	7.20	248.0	328	3.71	-	-6.20	-49.0
W13B-1	2017-12-26	3.57	13.0	8.47	-33.1	570	7.06	<1.6		
W13B-2	2017-12-26	20	13.7	7.98	-3.2	563	4.11	1.8		
W13B-3	2017-12-26	40	14.1	7.87	50.0	560	7.47	2.1		
W13B-1	2018-02-21	3.52	14.0	7.99	42.4	430	1.85	3.2	-7.25	-51.1
W13B-2	2018-02-21	20	14.0	7.93	39.8	429	2.02	<2.0	-7.27	-51.6
W13B-3	2018-02-21	40	14.2	7.93	45.0	432	2.32	<1.9	-7.26	-51.5
W13B-1	2018-04-19	3.52	15.9	7.35	256.8	534	2.04	8.9		
W13B-2	2018-04-19	20	15.9	7.22	263.2	444	1.66	10.0		
W13B-3	2018-04-19	40	16.2	7.22	272.3	443	1.95	10.0		
W13B-1	2018-06-26	3.50	17.5	7.61	-1.4	504	3.79	4.2		
W13B-2	2018-06-26	20	17.5	7.77	30.3	495	3.52	2.7		
W13B-3	2018-06-26	40	18.0	7.44	49.1	492	3.88	3.5		

[표 3.12.1] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

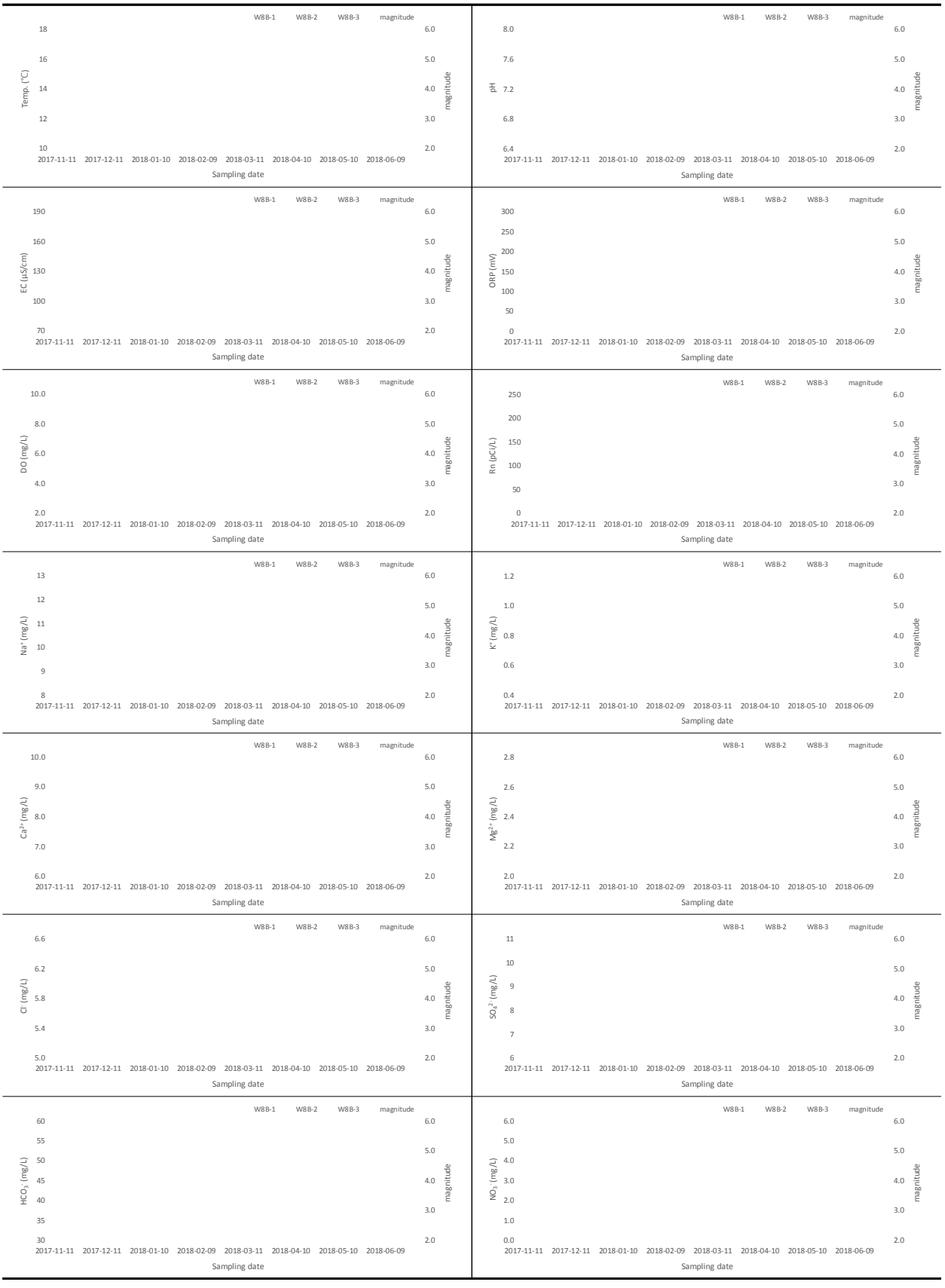
Sample no.	Sampling date	Concentration (mg/L)									
		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SiO_2	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	F^-	HCO_3^-
W13B	2017-11-17	20.90	2.17	42.60	9.03	34.50	11.90	61.70	0.95	0.69	122.04
W13B-1	2017-12-01	27.40	2.18	47.46	9.81	18.56	19.50	62.39	4.76	1.07	128.14
W13B-2	2017-12-01	30.15	2.26	46.37	9.70	18.40	16.08	64.85	2.76	0.63	134.24
W13B-3	2017-12-01	31.52	2.20	47.72	9.88	18.41	18.19	66.16	2.96	1.26	131.19
W13B-1	2017-12-26	27.49	2.67	43.43	9.75	19.05	19.00	67.28	1.39	1.67	115.94
W13B-2	2017-12-26	27.41	2.51	43.77	9.73	19.03	23.56	70.47	3.00	1.84	118.99
W13B-3	2017-12-26	28.68	2.62	44.48	10.07	19.57	17.11	71.14	2.16	2.00	129.67
W13B-1	2018-02-21	28.40	2.43	48.30	10.50	17.50	14.53	80.53	1.24	1.25	117.46
W13B-2	2018-02-21	29.10	2.50	49.10	10.80	18.00	15.90	79.49	1.00	0.94	120.51
W13B-3	2018-02-21	29.40	2.44	49.40	10.70	17.70	16.29	80.57	1.30	1.03	117.46
W13B-1	2018-04-19	33.37	2.35	45.26	9.77	16.78	16.66	101.79	2.02	1.64	128.14
W13B-2	2018-04-19	33.06	2.92	44.88	9.60	16.83	18.62	101.10	2.18	1.92	123.57
W13B-3	2018-04-19	34.45	2.30	45.89	9.90	17.58	16.02	99.93	1.64	1.46	126.62
W13B-1	2018-06-26	34.35	2.75	54.88	11.83	18.48	17.72	115.49	3.98	1.95	109.84
W13B-2	2018-06-26	33.76	2.72	54.09	12.20	18.05	15.69	113.97	4.77	1.64	118.99
W13B-3	2018-06-26	33.78	2.74	55.40	11.70	18.04	15.37	114.68	2.78	1.47	122.04



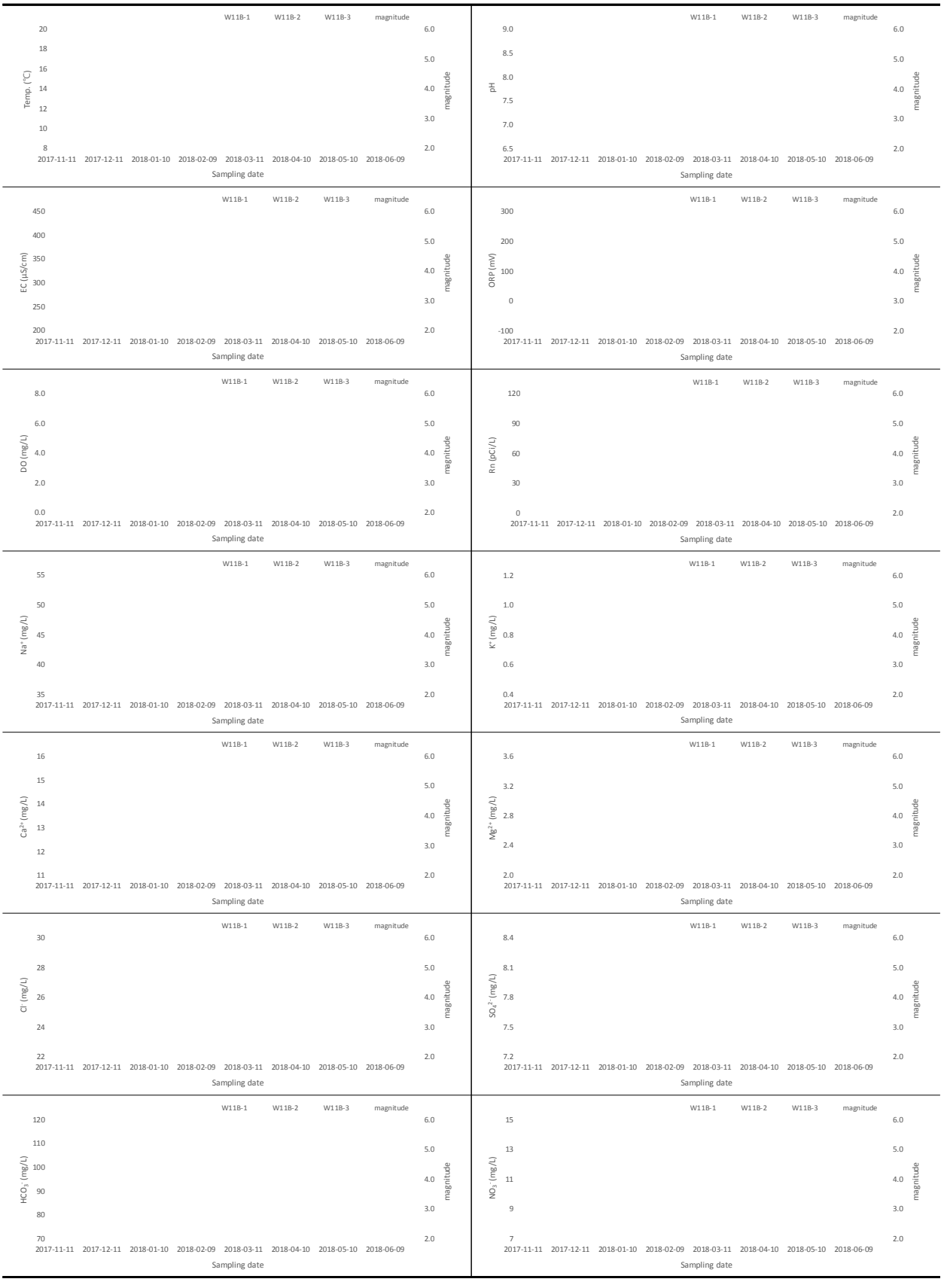
[그림 3.12.1] W1B 관측소의 현장측정, 라돈농도 및 주요 이온 분석결과



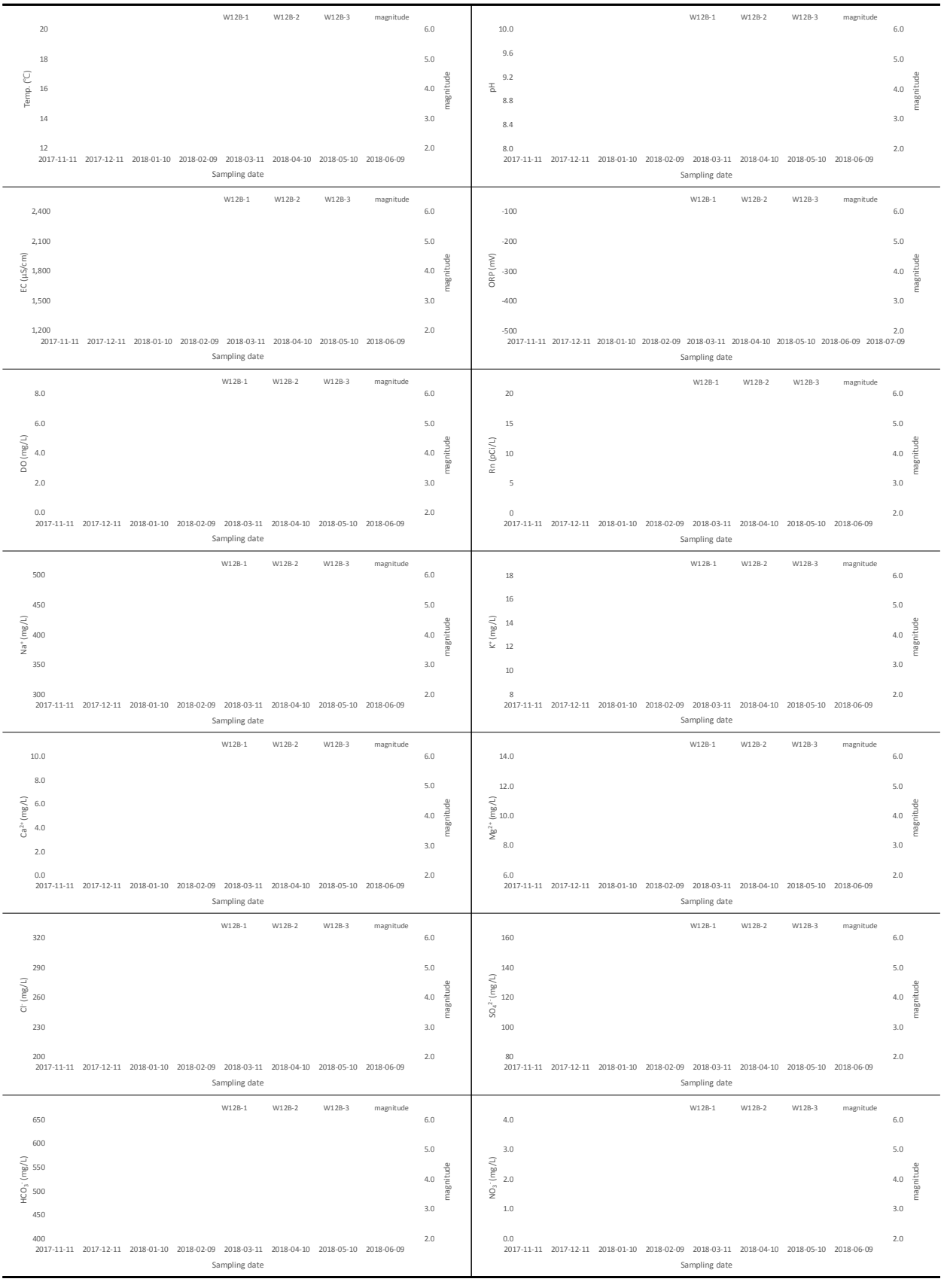
[그림 3.12.2] W2B 관측소의 현장측정, 라돈농도 및 주요이온 분석결과



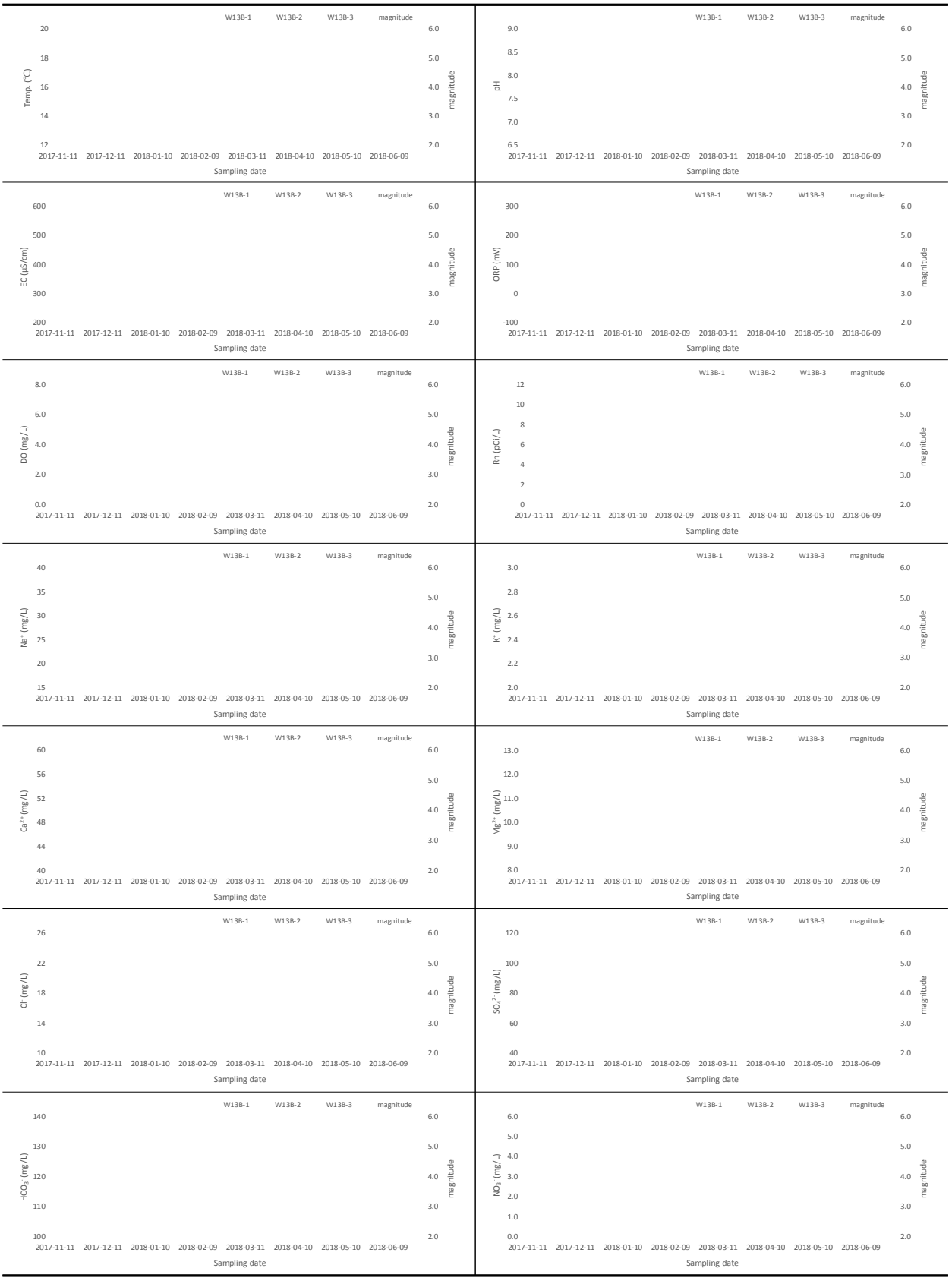
[그림 3.12.3] W8B 관측소의 현장측정, 라돈농도 및 주요이온 분석결과



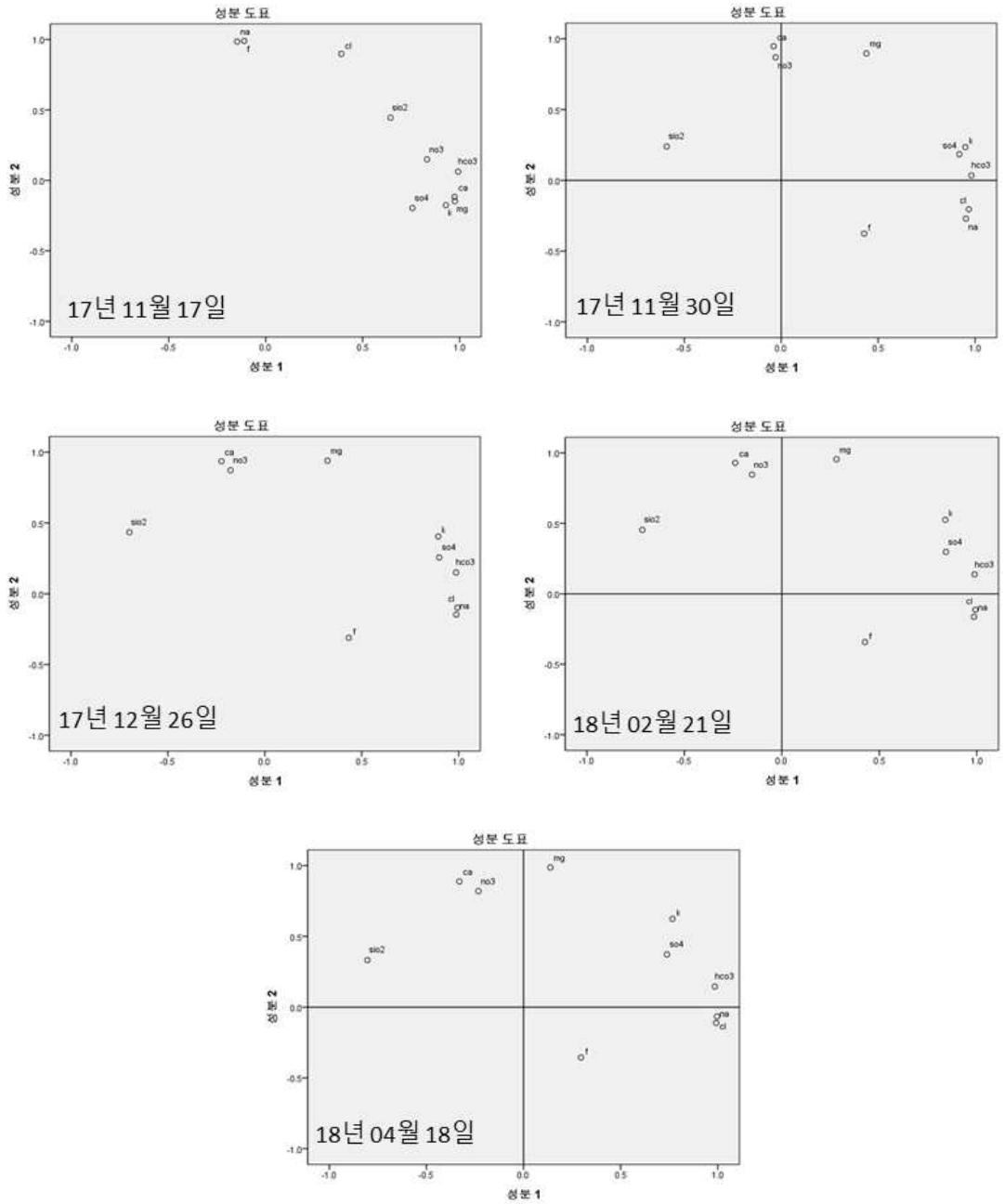
[그림 3.12.4] W11B 관측소의 현장측정, 라돈농도 및 주요이온 분석결과



[그림 3.12.5] W12B 관측소의 현장측정, 라돈농도 및 주요이온 분석결과



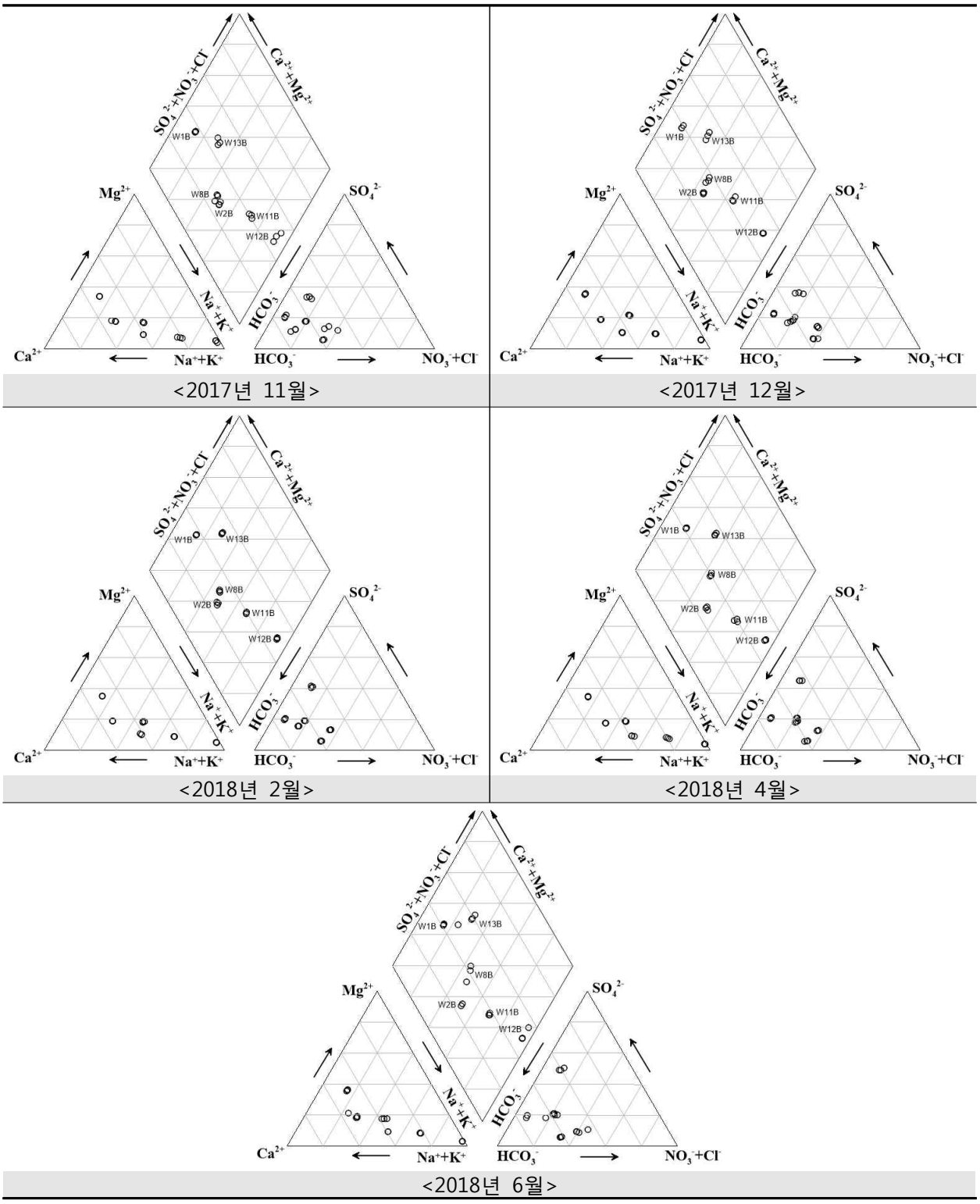
[그림 3.12.6] W13B 관측소의 현장측정, 라돈농도 및 주요이온 분석결과



[그림 3.12.7] 시기별 지하수 이온의 주성분 분석 결과

○ 관측소별 수질 유형 분석

각 관측소에서 분석된 결과를 토대로 Piper diagram을 도시하였다. W1B 관측소는 Ca-HCO_3 Type, W2B 관측소는 분석시기에 따라 약간의 차이를 보이지만 Ca-HCO_3 Type과 Na-HCO_3 Type이 복합적으로 나타난다. W8B 관측소는 Ca-HCO_3 Type, W11B 관측소는 Na-HCO_3 Type, W12B 관측소는 Na-HCO_3 Type과 Na-Cl Type이 복합적으로 나타난다. W13B 관측소는 Ca-HCO_3 Type을 보인다(그림 3.12.8).



<2017년 11월> <2017년 12월>

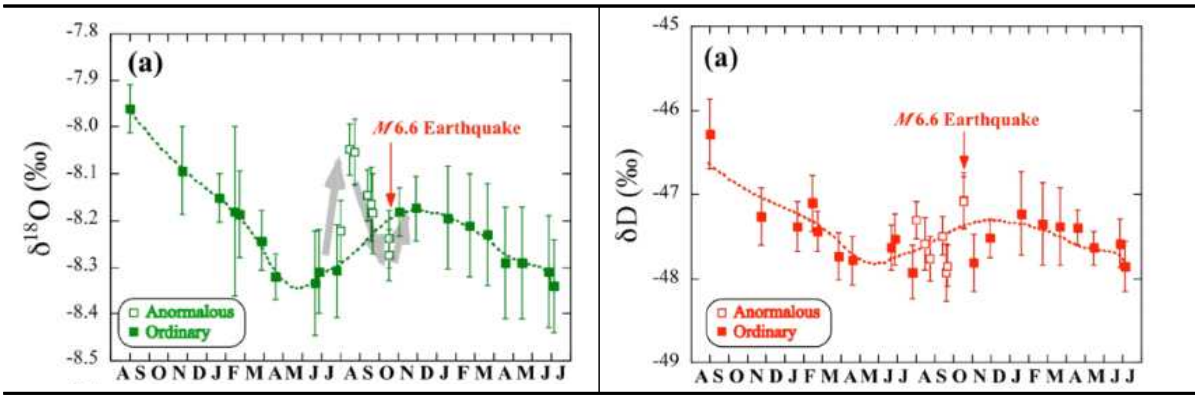
<2018년 2월> <2018년 4월>

<2018년 6월>

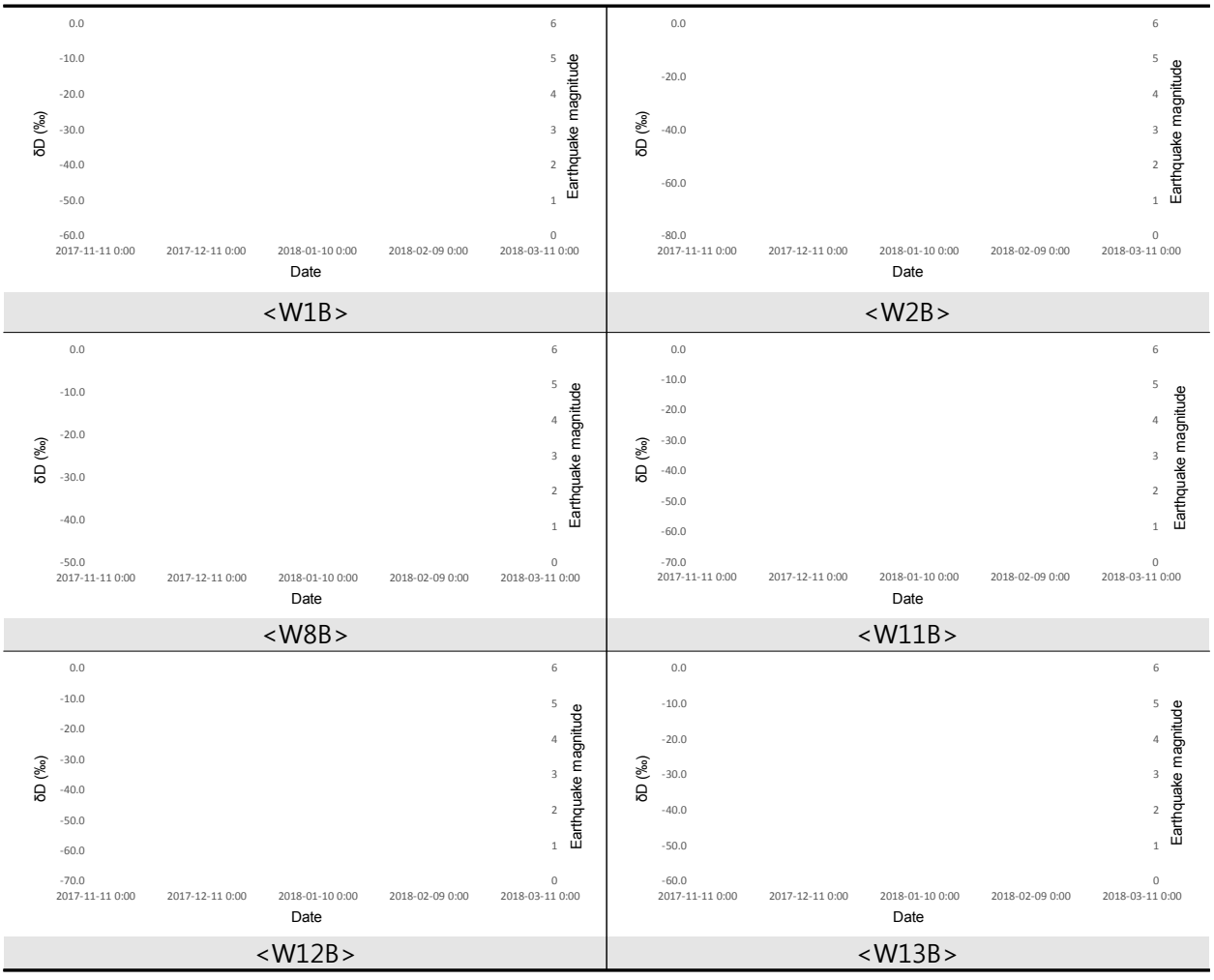
[그림 3.12.8] 각 관측정 시료채취 시기에 따른 지하수 유형을 파악하기 위한 Piper diagram

○ 관측소별 동위원소 특성

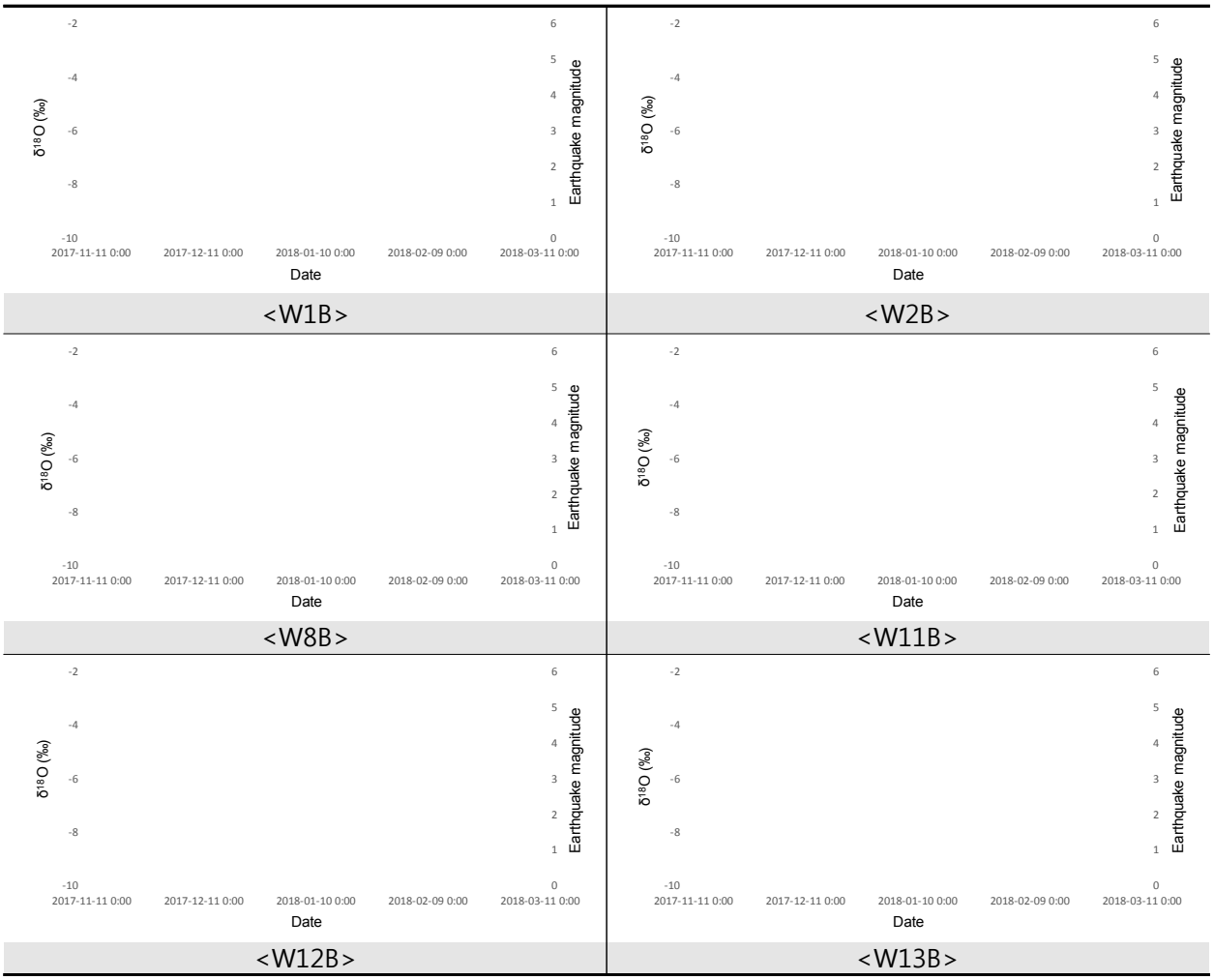
Satoki Onda et al.(2017) 연구결과에 따르면 일본에서 발생한 규모 6.6의 Tottori 지진 발생전에 전조 현상으로 산소동위원소비가 변화되는 특성이 나타났다(그림 3.12.9). 또한 Skelton et al.(2014)는 지진관측과 병행된 6년여 기간의 지하수 화학적 특성변화의 장기 모니터링을 통하여 지진의 전조현상으로 수소 안정동위원소비와 주 화학성분의 변동을 보고한 바 있다.



[그림 3.12.9] 2015년 9월~2017년 7월까지 HKM 현장에서 지하수의 동위원소 변동 특성



[그림 3.12.10] 관측소별 수소 안정동위원소비와 지진과의 상관관계



[그림 3.12.11] 관측소별 산소 안정동위원소비와 지진과의 상관관계

이러한 선행 연구결과를 토대로 각 관측소에서 분석된 동위원소 결과를 지진과 도시하여 상관관계를 파악하고자 하였다(그림 3.12.9, 3.12.10, 3.12.11). 분석 결과에 의하면, 포항 본진 직후의 동위원소비가 타 기간에 비하여 낮거나 높은 경우로 구분이 된다. 수소동위원소비의 경우를 보면, W1B는 본진 직후 상대적으로 낮은 값을 보이며, W2B, W11B, W13B는 본진 직후가 상대적으로 높은 값을 보이고 있다. 산소 동위원소비를 보면, W1B, W13B는 본직 직후가 타 기간에 비하여 낮은 값을 보이며, W2B는 본진 직후가 타 기간에 비하여 높은 값을 보이고 있다. 포항 지진 이후 수개월간은 강우가 거의 없는 기간이며 시료 채취시에도 강우 영향이 없는 기간인 점을 고려한다면, 이들 동위원소비의 변화는 지진에 의한 영향으로 보여진다. 지진 이전의 장기간의 분석 자료가 부족한 점을 고려할 때 본진 전후의 변동성을 확인하는 것은 어렵지만 지진에 의한 변화는 발생한 것으로 보인다.

13. 기타지역

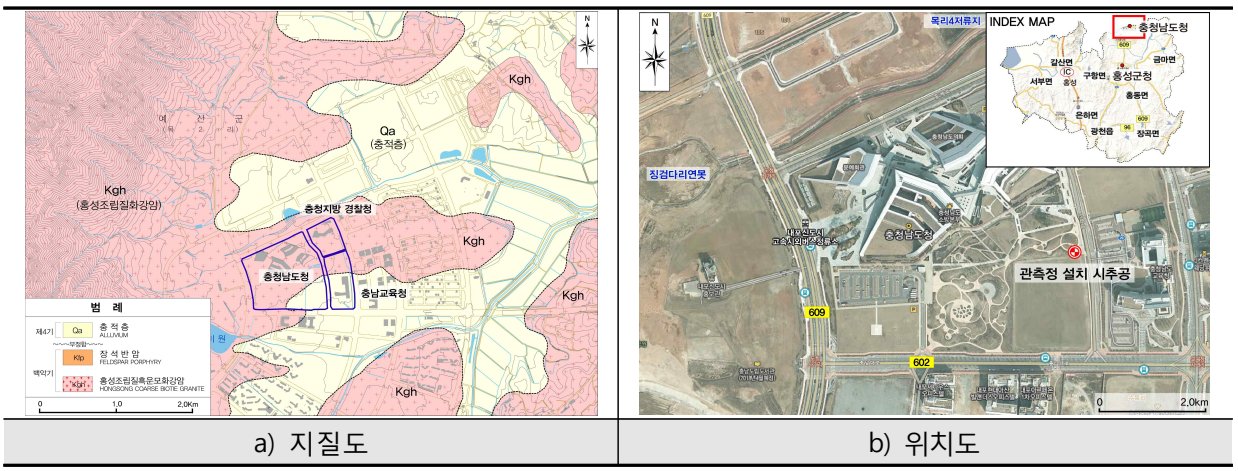
1) 홍성지역

○ 연구지역 선정

홍성지역은 과거 지진 발생 지역으로서 이 지역에 신규 관측정을 설치하여 지층의 분포 특성, 파쇄대의 발달, 지진과 지하수위의 상관성 분석을 위해 자동 지하수위 및 라돈계측 설비를 설치 · 운영하고자 하였다.

○ 연구지역 지질특성

연구지역은 용봉산을 중심으로 주변에 갈산리, 홍성읍, 일원산 및 홍암리를 연결한 광대한 반원형의 지역에 조립질흑운모화강암이 분포한다(그림 3.13.1a). 암상은 일반적으로 조립질이며 조암광물 중 장석은 다소 핑크색을 보이며 특히 풍화대에서는 더욱 현저하다는 점이 특징이다. 조립질흑운모화강암은 가리장석, 석영, 흑운모로 구성되어 있으며, 가리장석은 대부분 미사장석이며 취편쌍정을 이루어 흔히 albite 변정을 보여준다. 그밖에 정장석도 많이 함유되는데 이들 장석류는 다소 분해되어 미정의 kaoline을 이루어 배태된다.



a) 지질도 b) 위치도

[그림 3.13.1] 연구지역 지질도 및 관측정 위치도

○ 관측정 설치를 위한 시추조사

신규관측정은 연구지역인 충남도청 근처 공원에 위치하고 있으며(그림 3.13.1b), 2017년 9월 7일부터 9월 11일까지 5일간의 일정으로 시추조사를 수행하였다(그림 3.13.2). 관측정 설치를 위해 시추를 진행하면서 심도별 표준관입시험 및 현장투수시험을 병행하였다. 시추조사 완료 후 지층 내 파쇄대 및 지층구조를 파악하기 위하여 공내영상촬영을 수행하였다.

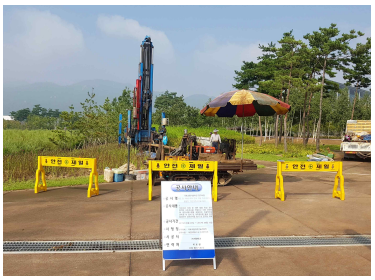
연구지역 관측정은 표 3.13.1과 같은 제원으로 설치하였다. 설치된 관측정은 75 mm의 구경으로 심도 101.0 m까지 굴착하였다. 굴착 후 공벽 유지를 위해 50 mm 구경의 투명아크릴관을 설치하였으며, 관정 보호를 위해 상부보호시설을 설치하고 시추조사를 마무리 하였다. 관측정 굴착 후 측정한 지하수위는 8.1 m로 확인되었다.

[표 3.13.1] 연구지역 관측정 설치 제원

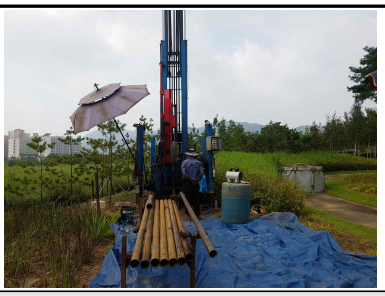
Well Name	Well diameter (mm)	Well Depth (m)	Acrylicpipe diameter (mm)	groundwater level (m)
HS-1	75	101	50	8.1



a) 현장전경



b) 시추전경



c) 굴착



d) 회수된 시추코어



e) 표준관입시험



f) 현장투수시험용 패커

g) 현장투수시험

h) 우물자재(아크릴관) 삽입

i) 굴착 완료 및 상부보호시설 설치

[그림 3.13.2] 시추조사 현황

연구지역 관측정의 시추조사 결과 0.0~7.0 m구간은 매립층으로 자갈섞인 실트질 모래로 구성되어 있으며, 갈색에서 황갈색을 띄고 있다. 7.0~14.0 m 구간은 풍화토로 암편, 실트 및 모래로 구성되어 있으며, 풍화정도가 심하며 갈색에서 담갈색을 띄고 있다. 14.0~18.8 m 구간은 풍화암으로 암편, 실트 및 모래로 구성되어 있으며, 풍화정도가 심하며 담회색에서 암회색을 띄고 있다. 연암구간은 18.8~58.5 m, 63.5~80.2 m, 88.9~93.5 m에서 확인되었으며 조립질흑운모화강암, 장석반암으로 구성되어 있다. 또한 연암 구간의 풍화정도는 보통 풍화 또는 심한 풍화상태를 보이며, 담회색에서 암회색을 띄고 있다. 보통암 구간은 58.5~63.5 m, 80.2~88.9 m에서 확인되었으며 조립질흑운모화강암, 장석반암으로 구성되어 있다. 보통암 구간의 풍화정도는 보통 풍화 상태를 보이며, 담회색에서 암회색을 띄고 있다. 93.5~101.0 m 구간은 경암 구간으로 조립질흑운모화강암으로 구성되어 있으며, 풍화정도는 보통이며 담회색에서 암회색을 띄고 있다.

○ 관측정 현장시험 결과

표준관입시험은 로드 끝에 외경 5.1 cm, 내경 3.5 cm, 길이 81 cm의 스플릿 스푼 샘플러를 부착하고, 시추공 내에서 무게 63.5 kg의 해머를 75 cm에서 낙하시켜 30 cm 관입시키는데 요하는 타격횟수(N값)를 측정하는 시험으로 연구지역 관측정에서는 1 m 간격으로 심도 19 m까지 시험을 수행하였다. 표준관입시험 결과 약 7.0 m까지는 3~5회 타격, 8.0~11.0 m까지는 17~39회 타격, 12.0~19.0 m까지는 50회 타격에 8~17cm 관입한 것으로 확인되었다(표 3.13.2).

[표 3.13.2] 관측정 내 심도별 표준관입시험 결과

심도(m)	N값	심도(m)	N값	심도(m)	N값
1	-	8	17/30	15	50/9
2	4/30	9	28/30	16	50/9
3	3/30	10	34/30	17	50/10
4	4/30	11	39/30	18	50/8
5	4/30	12	50/17	19	50/9
6	5/30	13	50/14		
7	3/30	14	50/15		

관측정의 각 심도별 투수계수를 확인하기 위한 현장투수시험을 수행하였으며, 그 결과 전 구간의 평균 수리전도도는 1.839×10^{-5} cm/sec로 나타났다. 상부 풍화가 심한 24.0~35.0 m 구간에서는 평균 수리전도도가 5.990×10^{-5} cm/sec로 나타났으며, 70.0 m 이상 풍화가 덜 진행된 구간의 평균 수리전도도는 8.185×10^{-7} cm/sec로 확인되었다(표 3.13.3).

[표 3.13.3] 심도별 현장투수시험 결과

심도(m)	수리전도도(cm/sec)	심도(m)	수리전도도(cm/sec)
24.0 ~ 27.0	4.886×10^{-5}	62.0 ~ 65.0	2.158×10^{-6}
32.0 ~ 35.0	7.095×10^{-5}	70.0 ~ 73.0	7.190×10^{-7}
43.0 ~ 46.0	2.871×10^{-6}	82.0 ~ 85.0	9.180×10^{-7}
53.0 ~ 56.0	2.266×10^{-6}	전구간 평균	1.839×10^{-5}

암반층 내에 발달하고 있는 지질구조 및 불연속면 분포 특성을 파악하고, 추후 파쇄대와 라돈 방출 특성에 관한 연구의 기초자료를 획득하기 위해 공내영상촬영을 실시하였다(그림 3.13.3). 시추공영상촬영은 암반층 내에 발달하고 있는 불연속면에 대한 방향 및 경사, 틈새, 단열 폭 등 다양한 지질 및 구조적 정보를 획득할 목적으로 실시하였다. 공내영상촬영의 시험방법은 다음과 같다.

① 굴진 완료된 시추공에 Dummy를 삽입하여 심도를 확인한다(시추공 내경은 NX size).

② 시추공 붕괴 위험이 있을 시 투명관(아크릴)을 설치한다.

③ 명반을 넣어 시추공 내 부유물질을 제거한다.

④ Logger, Cable Winch, Probe 및 전원공급 장치를 조립한다.

⑤ 전용 S/W를 통해 촬영 Image를 확인하면서 하향 또는 상향으로 공벽을 촬영한다.

⑥ 촬영이 종료되면 촬영 이미지를 저장하고 확인한다.

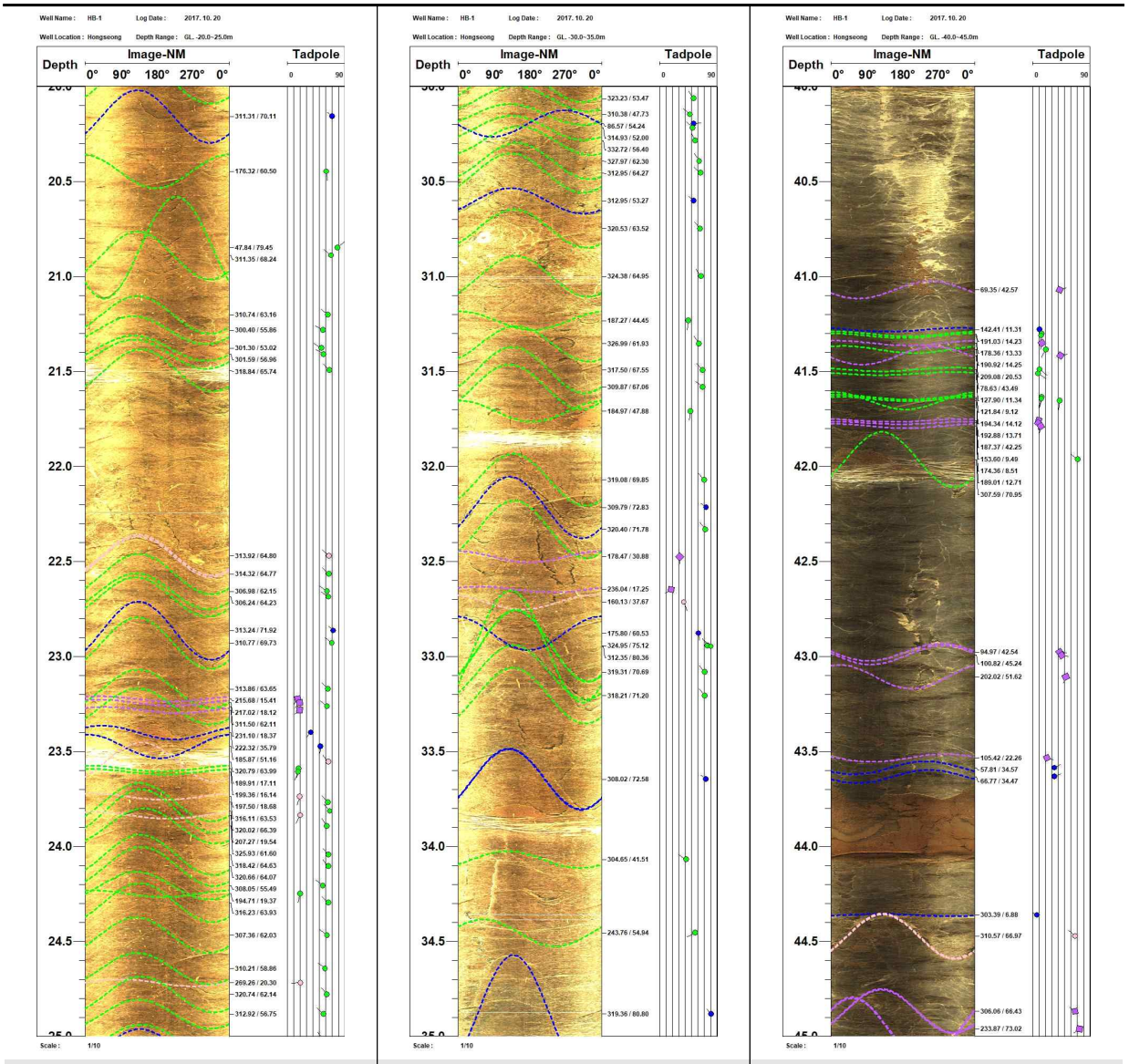


a) 공내영상촬영 모식도 | b) 공내영상촬영 전경

[그림 3.13.3] 공내영상촬영 모식도 및 전경

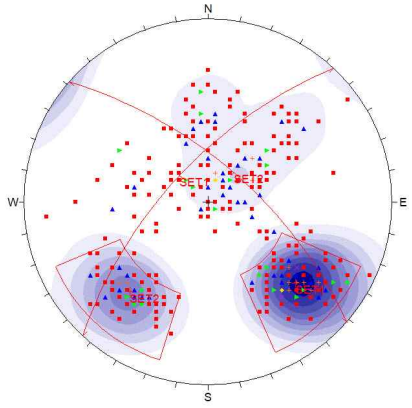
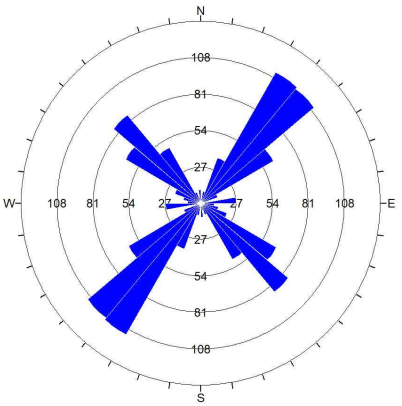
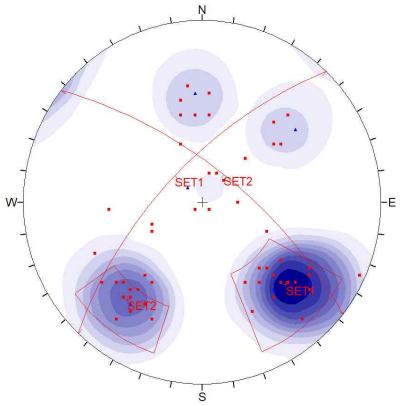
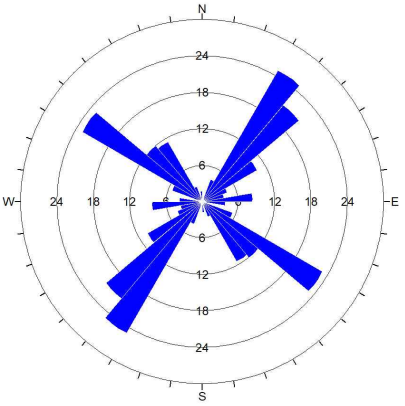
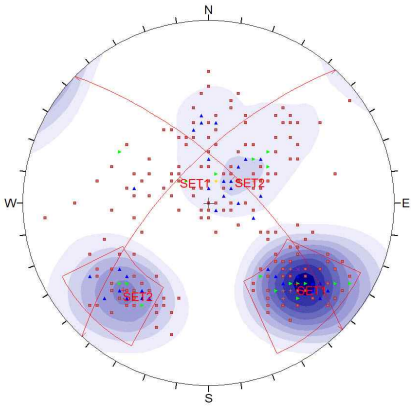
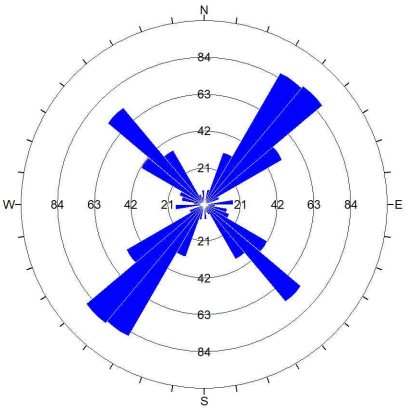
공내영상촬영은 Camera, Cone mirror, Azimuth sensor, Inclination 측정기 등이 장착된 Probe를 Winch에 연결 후 시추공 내에 하향 및 상향시켜가며 Cone mirror를 통해 360°방향으로 연속적인 심도를 촬영하며, 촬영되는 영상자료는 Digital로 전환되어 자동으로 노트북에 저장된다. 촬영 후 저장된 Digital 자료는 영상자료, Azimuth, Inclination, Depth 등의 정보를 포함하며, 자료처리 프로그램을 이용하여 불연속면의 발달 상태에 대한 분석과 화상출력을 수행한다(그림 3.13.4).

공내영상촬영 심도는 7.4~99.9 m 구간으로 하였으며 7.4~19.5 m, 35.5~41.1 m, 43.7~44.1 m 구간은 공벽붕괴로 인해 분석이 불가하였다.



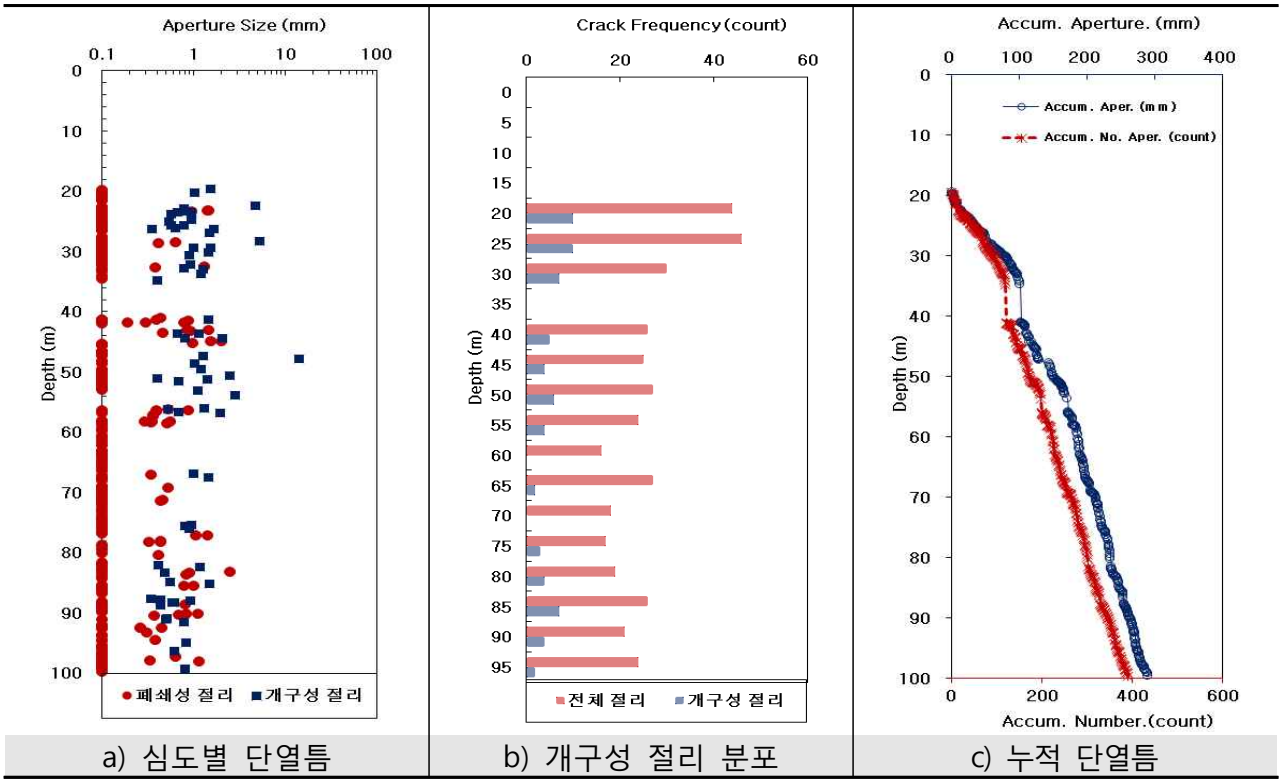
a) 20.0 ~ 25.0m　　b) 30.0 ~ 35.0m　　c) 40.0 ~ 45.0m

[그림 3.13.4] 공내영상촬영 결과

구분	불연속면 방향성(Dip · dir) 및 경사(Dip)		불연속면수
	contour & pole plot	Rose diagram	
전체			390개 (100%)
개구성 절리			68개 (17.4%)
폐쇄성 절리			322개 (82.6%)

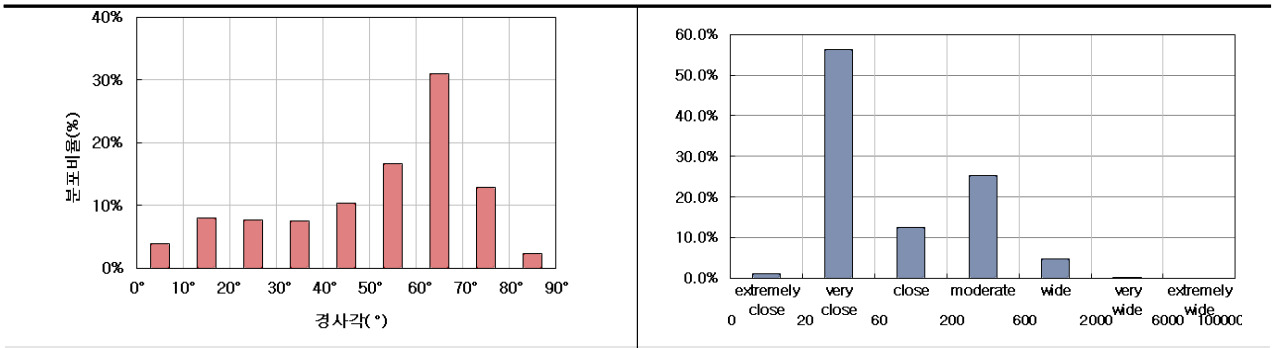
[그림 3.13.5] 불연속면 분포비율 및 방향성 분석

공내촬영영상 분석 결과 분석구간 내 총 390개의 불연속면이 분포하며(그림 3.13.5), 이 중 90개의 불연속면(open/fill: 20개, close: 70개)이 지표하 20.0~30.0 m 심도에 집중되어 가장 높은 빈도를 나타낸다. 개구성 절리는 전 구간에 걸쳐 다양한 심도에서 분포하는 것으로 나타났으며, 이 중 GL. -20.0~30.0 m 심도에서 가장 높은 빈도를 보이고, GL. -40.0~60.0 m, -85.0~95.0 m 구간은 상대적으로 높은 빈도로 분포한다. 불연속면의 누적 크기는 대체적으로 직선적 증가 양상을 보이며, 불연속면의 분포 빈도가 높은 20.0~35.0 구간에서 다소 크게 증가한다(그림 3.13.6).



a) 심도별 단열틈 b) 개구성 절리 분포 c) 누적 단열틈

[그림 3.13.6] 심도별 불연속면 분포양상



a) 경사(Dip) 분석 b) Joint spacing(ISRM)

[그림 3.13.7] 불연속면 경사 및 간격 분석 결과

[표 3.13.4] 심도별 현장투수시험 결과

촬영심도(m) \ 군별		All Discontinuity (Dir/Dip)	Open Crack & Filled (Dir/Dip)	Closed crack & vein (Dir/Dip)
GL. -7.4 ~ 99.9	주 방향	133/25	134/24	133/24
	부 방향	221/25	218/22	224/23

불연속면의 경사는 50~80° 의 중경사~고경사가 우세하게 나타났으며, 불연속면 간격은 20.0~60.0 mm가 우세하게 나타나 ISRM 기준에 따라 불연속면 발달 빈도(Very close spacing)가 높은 것으로 나타났다(그림 3.13.7). 절리틈의 크기는 0.0~14.38(평균 0.74)mm의 범위를 보인다. 측정 이미지로부터 조사공 내 Fracture zone의 발달은 지표하 34.7~36.1(1.4) m, 44.3~47.8(3.5) m. 48.6~49.3(0.7) m, 54.3~54.8(0.5) m 구간에서 분포하는 것으로 나타났다. 단열의 주방향은 N43E/25SE(133/25), 부방향은 N49W/25SW(221/25)를 각각 나타내고, 이 외 다양한 방향성을 갖는 불연속면이 전 심도에 걸쳐 분포하는 것으로 나타났다(표 3.13.4).

○ 계측시스템 구축

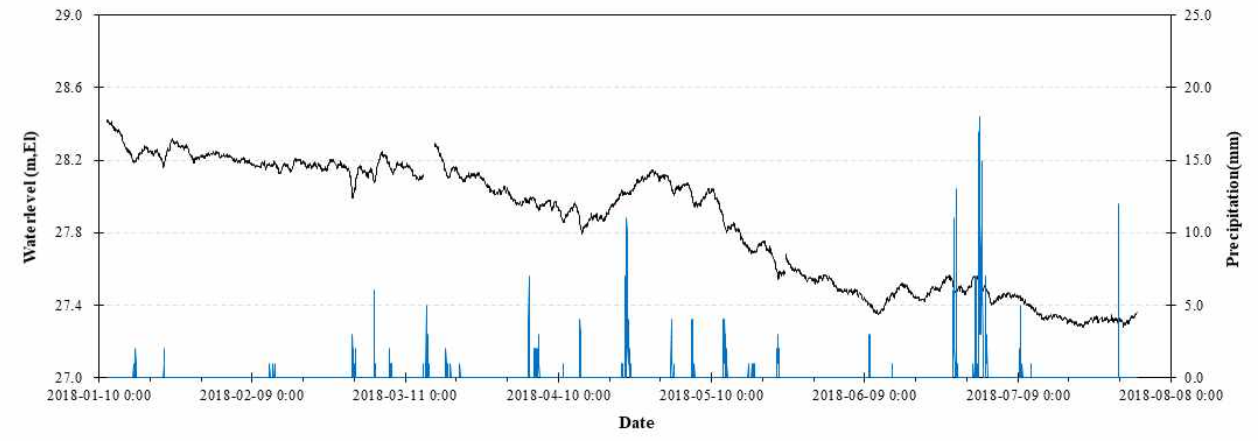
관측정의 단열대 구간에서 방출되는 라돈 농도 및 지하수위 변화를 관측하기 위하여 라돈 계측기, CTD Diver를 설치 · 운영하였다(그림 3.13.8). 계측시스템 구축 시점의 지하수위가 6.38 m로 측정되어 지하수위를 기준으로 2 m 아래에 라돈 계측기를 설치하였다. 또한 지하수위 및 전기전도도, 온도 변화를 관측하기 위한 CTD Diver는 20 m에 설치하였으며 측정간격은 5분으로 동일하게 설정하였다. 모든 시설물 보호를 위한 보호함체를 설치하고, 시설물 안내를 위한 표지판을 설치하였다.

<table>
<tr><td>  </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>a) 케이블 매설을 위한 터파기</td><td>b) 케이블 매설</td><td>c) 보호함체 설치</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td><td></td></tr>
<tr><td>d) 계측 장비(라돈, CTD)</td><td>e) 라돈계측기 설치</td><td>f) CTD Diver 설치</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>g) Data logger 배터리 설치</td><td>h) 계측 장비 셋팅</td><td>i) 설치 완료</td></tr>
</table>

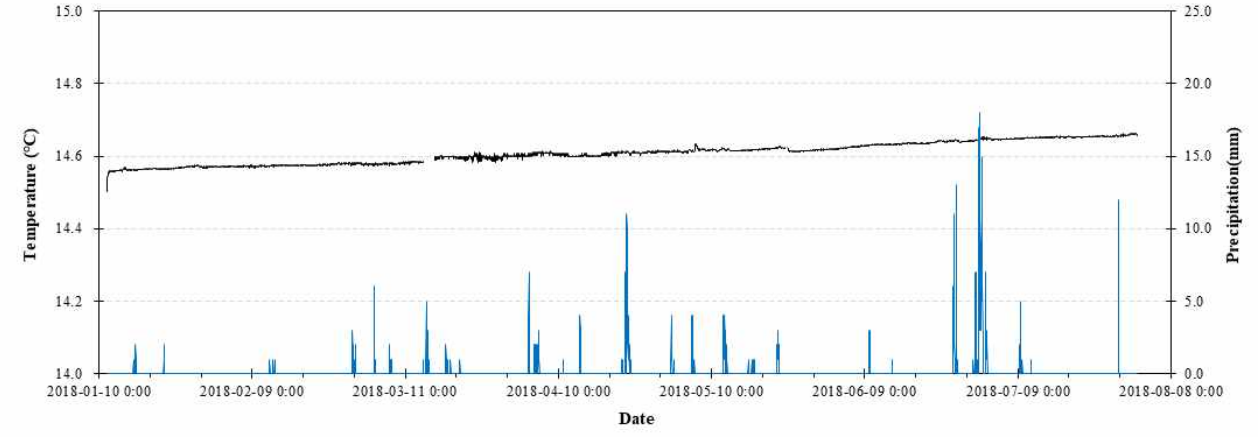
[그림 3.13.8] 라돈 및 지하수위 계측 시스템 구축 현황

○ 지하수위 및 라돈 계측 결과

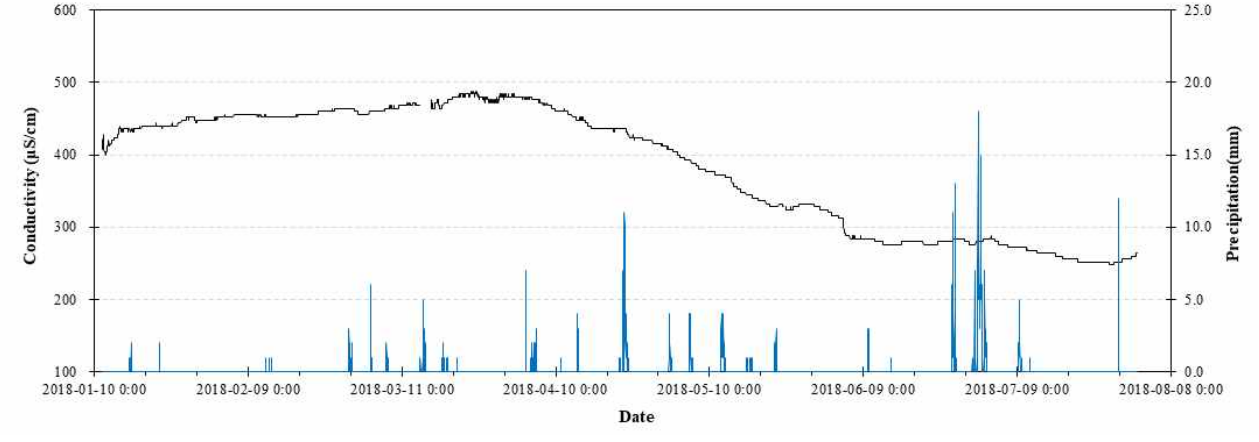
관측정 내 지하수위 계측을 위해 CTD Diver를 설치하였으며, 2018년 1월부터 2018년 8월까지 진행하였다. 계측결과 1월부터 3월까지 큰 변화가 없던 수위가 3월 이후 감소하는 경향을 보였으며 4월 강우에 의한 일시적으로 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 보인다. 그러나 7~8월 집중된 강우에는 지하수위의 변화가 크게 나타나지 않았다(그림 3.13.9). 지하수의 온도는 일반적인 지하수 온도 범위를 보이지만 미세하게 증가하는 경향을 보인다(그림 3.13.10). 전기전도도는 4월 이후 감소하는 경향을 보이고 있으며, 6월 이후에는 안정화되는 경향을 보인다(그림 3.13.11).



[그림 3.13.9] 관측정 내 지하수위 계측 자료 시계열 그래프



[그림 3.13.10] 관측정 내 지하수 온도 계측 결과 시계열 그래프



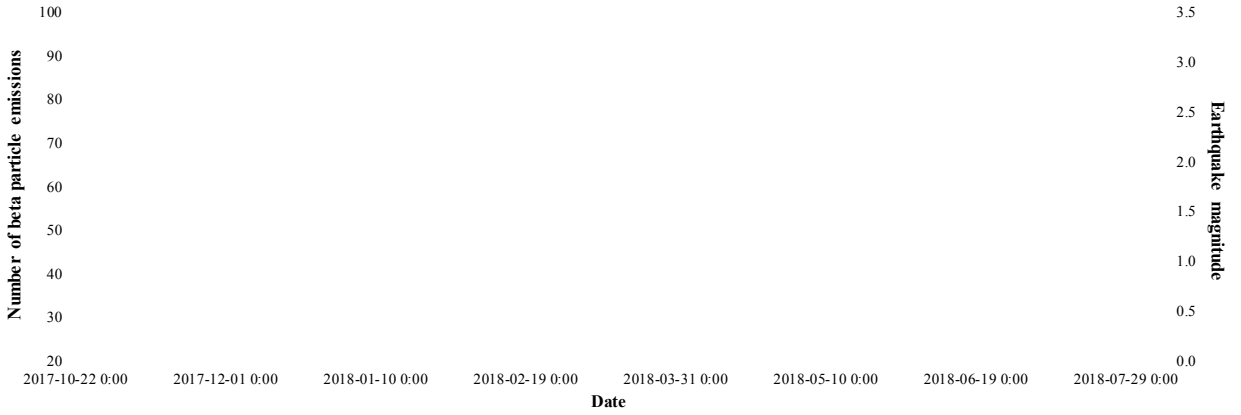
[그림 3.13.11] 관측정 내 지하수 전기전도도 계측 결과 시계열 그래프

관측정 내 라돈 계측은 2017년 10월부터 2018년 8월까지 진행하였다. 라돈 계측 결과를 1시간 단위로 환산하였으며 그 결과 58~89 count/hr 범위로 나타났으며, 평균 방출 횟수는 57.34 count/hr 정도로 확인되었다. 관측정 내 라돈 계측 결과는 일정한 범위를 유지하는 것으로 나타났으며, 최고 방출 횟수를 보이는 2018년 05월 26일 03:00 시간대의 자료는 지진, 강수 등의 외부 요인이 없는 것으로 보아 자연적인 방출량인 것으로 보인다(그림 3.13.12).

○ 심도별 라돈 분석, 현장측정 및 이온분석 결과

관측정 내 지하수에 대한 심도별 변화를 파악하기 위하여 주기적으로 5회에 걸쳐 시료채취 및 현장 측정을 수행하였다. 관측정 설치 후 1차 조사 결과에서는 라돈 농도가 단열구간(20~40 m)에서 4,000 pCi/L이상 높은 값을 보였으나 시간이 지남에 따라 전 구간에서 비슷한 농도값을 보이는 것으로 나타났다. 현장측정 결과 1차 조사 결과에서 심도별 차이를 나타냈던 항목(pH, EC)에서도 라돈과 비슷한 양상을 보이고 있다.

관측정 내 지하수의 심도별 주요이온 분석결과 1차 조사에서 다른 구간보다 단열구간에서 높은 함량을 보였던 Na^+, K^+, Cl^-, NO_3^- 이온들이 2~5차 조사에서는 심도별 농도차이가 없는 것으로 나타났다. 심도별 농도차이를 보였던 다른 이온들도 1차 분석 결과를 제외하고 심도별 차이가 거의 없는 것으로 나타났다(그림 3.13.13).



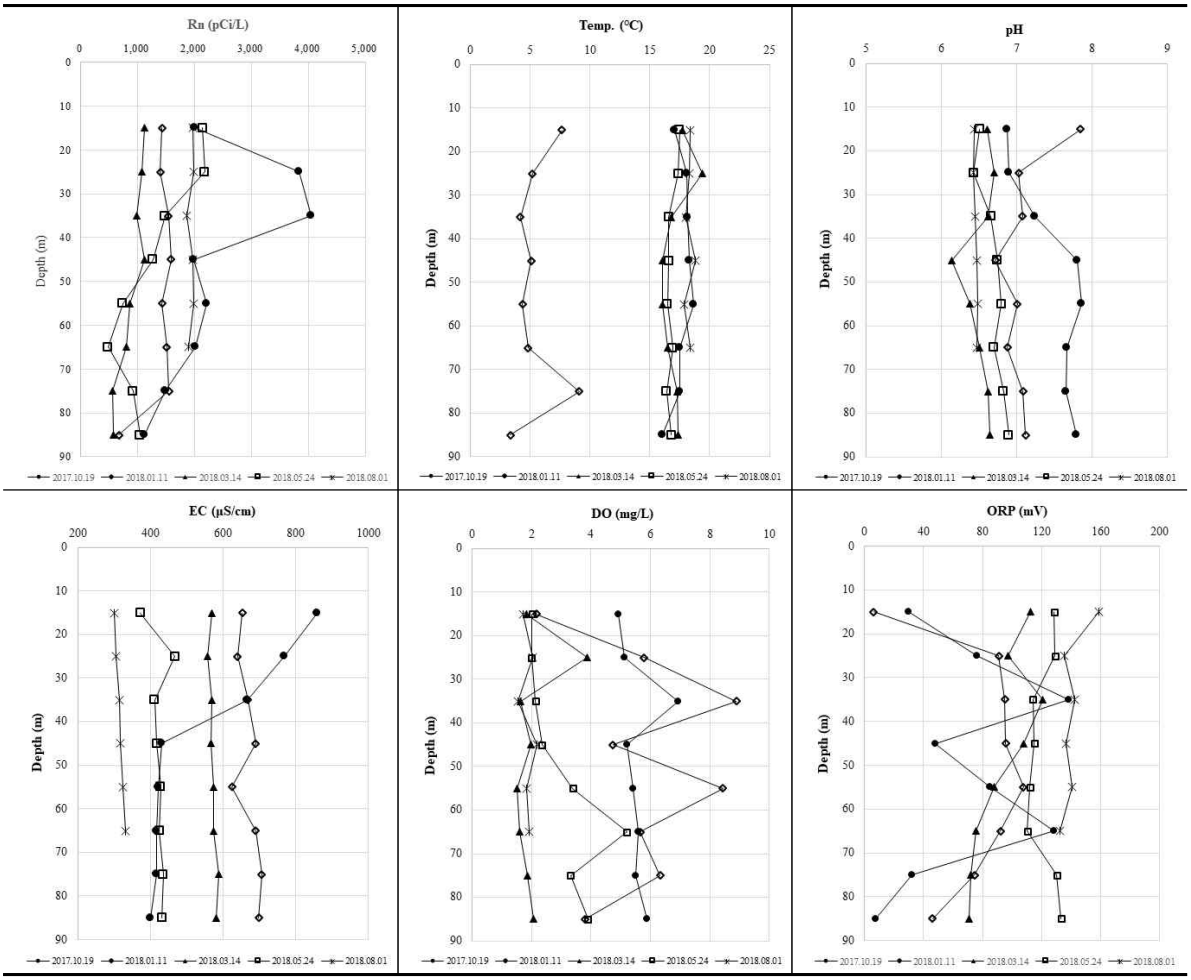
[그림 3.13.12] 라돈 계측 자료 시계열 그래프

[표 3.13.5] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과

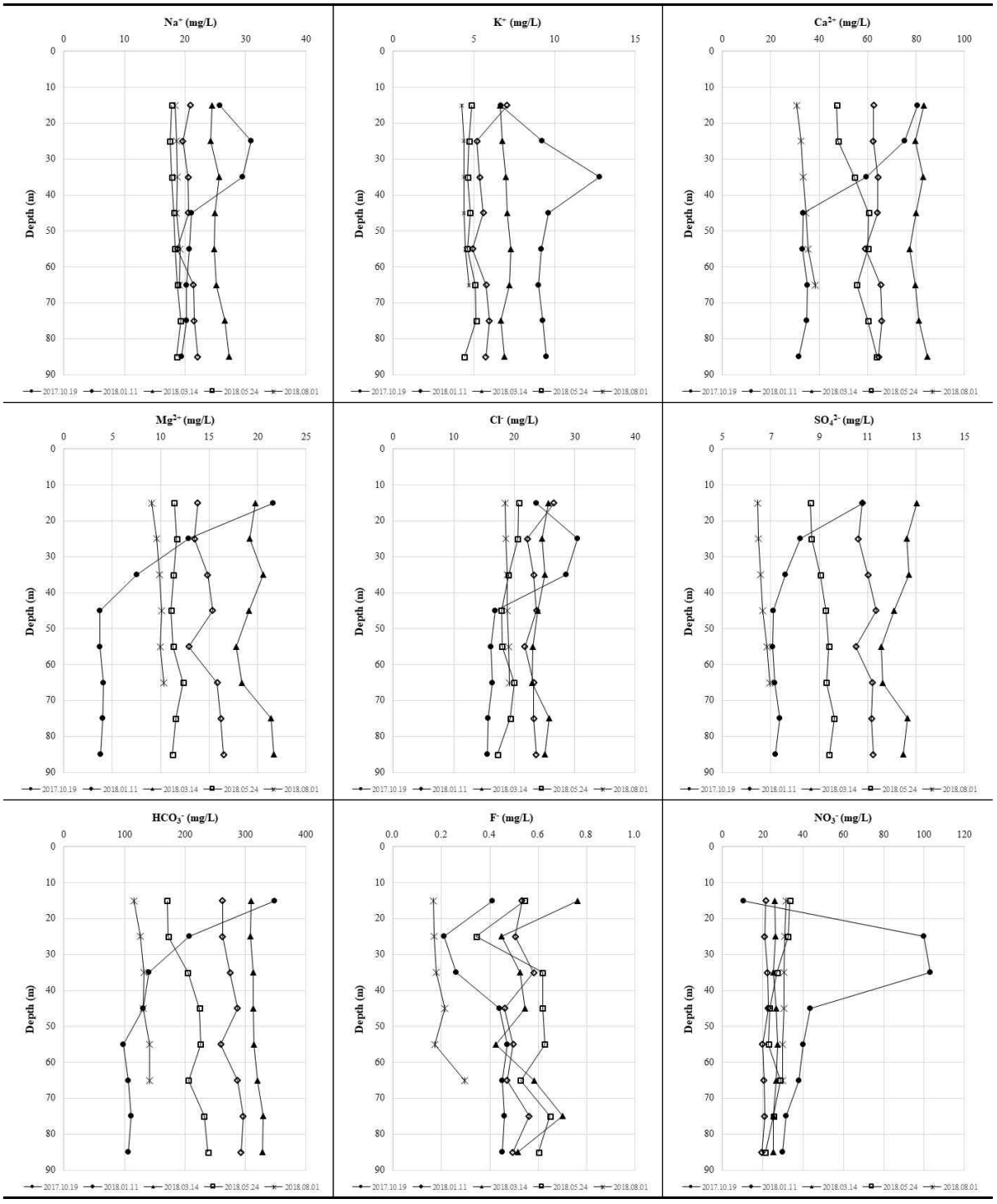
Sample no.	Sampling date	Sampling Depth	Temp. (℃)	pH	ORP (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	Rn (pCi/L)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
HS-1	2017-10-19	15	17.1	6.88	29.9	860	4.92	2,000	-7.101	-44.935
HS-1	2018-01-11	15	7.7	7.85	6.3	773	2.16	1,430	-7.286	-46.379
HS-1	2018-03-14	15	17.7	6.61	112.4	568	1.85	1,120	-7.277	-45.856
HS-1	2018-05-24	15	17.5	6.51	128.3	372	2.02	2,140	-	-
HS-1	2018-08-01	15	18.4	6.44	159.0	301	1.72	1,970	-	-
HS-2	2017-10-19	25	18.1	6.90	76.2	770	5.13	3,830	-7.293	-48.584
HS-2	2018-01-11	25	5.2	7.03	90.9	414	5.79	1,400	-7.302	-47.941
HS-2	2018-03-14	25	19.4	6.71	97.4	557	3.88	1,080	-7.285	-46.331
HS-2	2018-05-24	25	17.4	6.43	129.1	467	2.01	2,180	-	-
HS-2	2018-08-01	25	18.3	6.43	135.3	304	2.04	1,990	-	-
HS-3	2017-10-19	35	18.2	7.25	138.5	666	6.92	4,040	-7.029	-48.145
HS-3	2018-01-11	35	4.2	7.08	94.9	754	8.89	1,540	-7.299	-47.585
HS-3	2018-03-14	35	16.8	6.63	120.9	570	1.62	980	-7.292	-46.580
HS-3	2018-05-24	35	16.6	6.66	114.0	411	2.13	1,480	-	-
HS-3	2018-08-01	35	18.0	6.45	142.2	314	1.55	1,860	-	-
HS-4	2017-10-19	45	18.3	7.81	48.1	432	5.20	1,980	-6.146	-44.316
HS-4	2018-01-11	45	5.1	6.72	95.7	422	4.74	1,590	-7.234	-47.122
HS-4	2018-03-14	45	16.1	6.14	108.0	567	1.97	1,120	-7.333	-48.052
HS-4	2018-05-24	45	16.6	6.75	115.0	417	2.35	1,270	-	-
HS-4	2018-08-01	45	18.8	6.48	136.4	316	2.18	1,970	-	-
HS-5	2017-10-19	55	18.7	7.87	85.1	422	5.42	2,220	-6.275	-44.145
HS-5	2018-01-11	55	4.4	7.01	107.6	745	8.43	1,430	-7.258	-47.444
HS-5	2018-03-14	55	16.1	6.38	88.0	574	1.52	870	-7.435	-47.733
HS-5	2018-05-24	55	16.5	6.80	112.0	428	3.38	740	-	-
HS-5	2018-08-01	55	17.9	6.49	140.5	325	1.83	1,990	-	-
HS-6	2017-10-19	65	17.5	7.67	128.0	417	5.58	2,010	-6.237	-44.221
HS-6	2018-01-11	65	4.8	6.88	92.0	471	5.65	1,510	-7.233	-47.221
HS-6	2018-03-14	65	16.5	6.51	75.7	573	1.61	800	-7.420	-47.335
HS-6	2018-05-24	65	16.9	6.70	110.3	424	5.20	480	-	-
HS-6	2018-08-01	65	18.4	6.48	132.4	330	1.91	1,890	-	-
HS-7	2017-10-19	75	17.5	7.66	32.1	417	5.50	1,490	-6.132	-43.816
HS-7	2018-01-11	75	9.1	7.09	74.5	761	6.32	1,550	-7.239	-46.428
HS-7	2018-03-14	75	17.3	6.62	72.0	588	1.87	560	-7.318	-46.355
HS-7	2018-05-24	75	16.4	6.83	130.1	435	3.32	920	-	-
HS-7	2018-08-01	75	-	-	-	-	-	-	-	-
HS-8	2017-10-19	85	16.1	7.80	7.4	401	5.89	1,120	-6.162	-43.270
HS-8	2018-01-11	85	3.4	7.12	46.0	1971	3.81	670	-7.268	-45.939
HS-8	2018-03-14	85	17.4	6.65	70.9	580	2.08	570	-7.377	-47.202
HS-8	2018-05-24	85	16.8	6.90	133.2	432	3.89	1,040	-	-
HS-8	2018-08-01	85	-	-	-	-	-	-	-	-

[표 3.13.5] 관측소별 현장측정, 라돈, 동위원소 및 주요이온 분석결과(계속)

Sample no.	Sampling date	Concentration (mg/L)									
		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SiO_2	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	F^-	HCO_3^-
HS-1	2017-10-19	25.80	6.680	80.50	21.60	12.50	23.70	10.80	10.60	0.410	347.8
HS-1	2018-01-11	20.89	7.055	62.48	13.80	13.53	26.57	10.77	21.46	0.532	262.4
HS-1	2018-03-14	24.50	6.610	83.20	19.80	12.99	25.70	13.03	25.99	0.763	309.7
HS-1	2018-05-24	17.80	4.866	47.18	11.41	12.75	20.76	8.64	33.36	0.542	170.9
HS-1	2018-08-01	18.39	4.260	30.77	9.08	15.12	18.46	6.46	31.42	0.166	115.9
HS-2	2017-10-19	30.90	9.220	75.20	12.90	25.50	30.50	8.23	100.00	0.210	207.5
HS-2	2018-01-11	19.65	5.182	62.37	13.49	13.02	22.16	10.61	20.99	0.504	262.4
HS-2	2018-03-14	24.20	6.760	79.80	19.20	13.31	24.65	12.60	26.14	0.448	308.2
HS-2	2018-05-24	17.55	4.711	47.77	11.65	12.85	20.56	8.67	32.63	0.343	172.4
HS-2	2018-08-01	18.58	4.367	32.60	9.61	14.90	18.63	6.49	30.88	0.171	126.6
HS-3	2017-10-19	29.50	12.800	59.50	7.52	26.60	28.60	7.61	103.00	0.260	140.3
HS-3	2018-01-11	20.51	5.375	64.16	14.85	12.53	23.20	11.01	22.41	0.580	274.6
HS-3	2018-03-14	25.60	6.960	82.90	20.60	13.67	25.04	12.71	25.31	0.523	312.7
HS-3	2018-05-24	17.84	4.609	54.48	11.34	13.63	19.05	9.04	27.16	0.617	204.4
HS-3	2018-08-01	18.75	4.404	33.46	9.88	14.96	18.87	6.59	30.50	0.178	132.7
HS-4	2017-10-19	21.10	9.640	33.30	3.75	22.70	16.80	7.09	43.50	0.440	131.2
HS-4	2018-01-11	20.58	5.589	64.02	15.36	12.56	23.67	11.35	22.72	0.460	286.8
HS-4	2018-03-14	25.00	7.050	80.00	19.10	14.55	23.90	12.08	26.48	0.543	312.7
HS-4	2018-05-24	18.17	4.778	60.40	11.06	14.37	17.86	9.27	23.32	0.618	224.2
HS-4	2018-08-01	18.62	4.382	34.38	10.11	14.87	18.90	6.66	30.36	0.212	131.2
HS-5	2017-10-19	20.70	9.170	33.10	3.72	22.50	16.20	7.08	40.00	0.470	97.6
HS-5	2018-01-11	18.75	4.915	59.07	12.92	12.80	21.76	10.51	19.81	0.495	259.3
HS-5	2018-03-14	24.80	7.280	77.40	17.80	15.47	23.12	11.56	27.19	0.423	314.3
HS-5	2018-05-24	18.34	4.588	60.11	11.27	14.07	18.00	9.39	22.92	0.626	225.8
HS-5	2018-08-01	19.26	4.480	35.29	9.95	15.18	19.11	6.85	29.90	0.172	141.9
HS-6	2017-10-19	20.30	9.010	35.00	4.11	21.90	16.40	7.15	37.90	0.450	106.8
HS-6	2018-01-11	21.41	5.759	65.38	15.83	13.20	23.20	11.20	20.53	0.471	286.8
HS-6	2018-03-14	25.20	7.220	79.60	18.40	15.42	22.91	11.62	26.63	0.582	320.4
HS-6	2018-05-24	18.79	5.087	55.56	12.32	12.55	20.01	9.30	28.72	0.527	205.9
HS-6	2018-08-01	19.13	4.716	38.28	10.32	14.86	19.26	6.95	29.92	0.296	141.9
HS-7	2017-10-19	20.30	9.290	34.80	4.04	21.10	15.70	7.37	31.60	0.460	111.4
HS-7	2018-01-11	21.50	5.966	65.83	16.20	13.54	23.19	11.16	20.96	0.561	295.9
HS-7	2018-03-14	26.60	6.680	81.10	21.40	14.06	25.77	12.65	25.06	0.701	329.5
HS-7	2018-05-24	19.30	5.135	60.16	11.54	12.66	19.32	9.62	25.41	0.649	231.9
HS-7	2018-08-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HS-8	2017-10-19	19.40	9.470	31.60	3.79	21.10	15.60	7.18	29.80	0.450	106.8
HS-8	2018-01-11	22.11	5.744	64.49	16.48	13.28	23.62	11.23	19.46	0.494	292.9
HS-8	2018-03-14	27.30	6.910	84.80	21.70	14.31	25.10	12.48	25.15	0.516	328.0
HS-8	2018-05-24	18.67	4.427	63.79	11.21	13.06	17.25	9.41	21.34	0.601	238.0
HS-8	2018-08-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



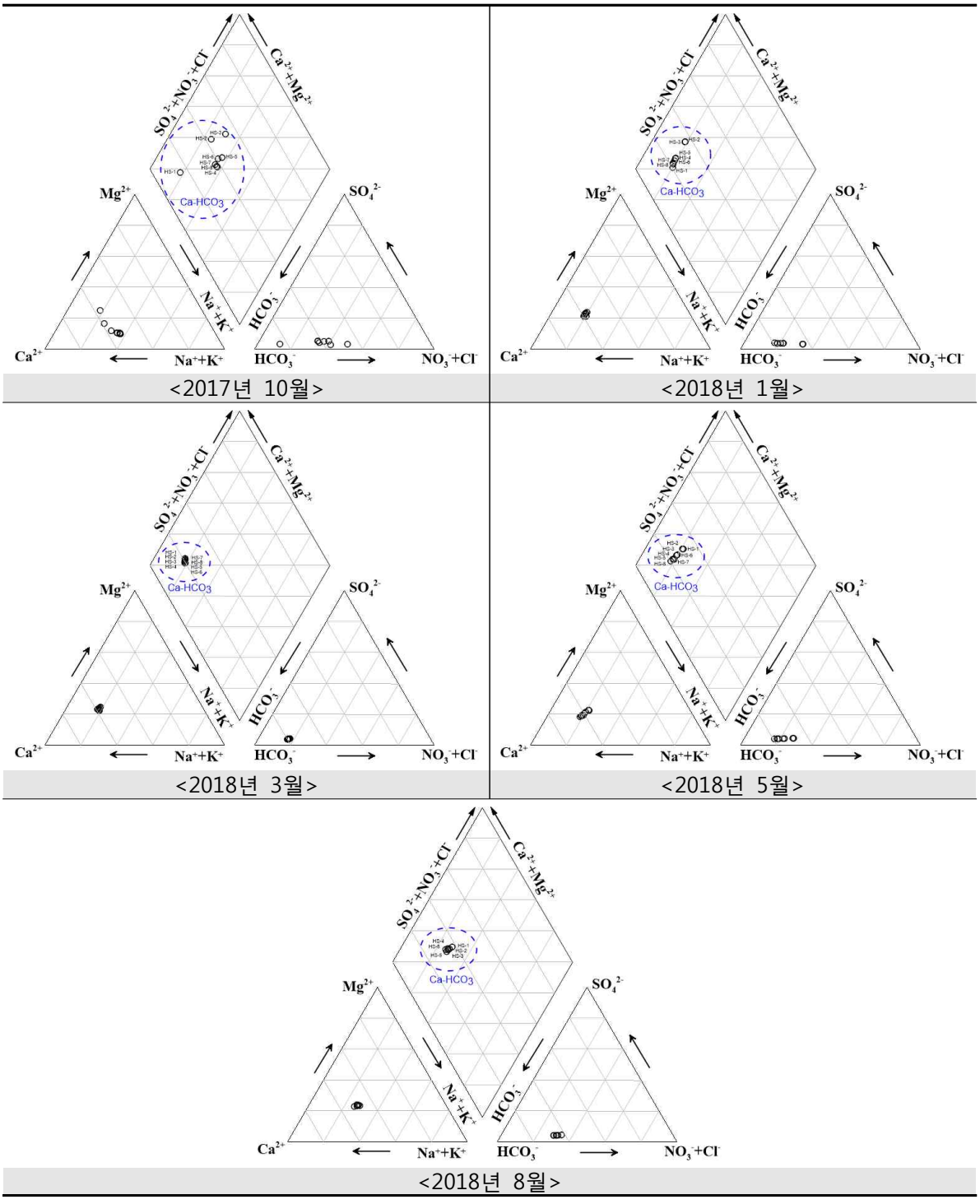
[그림 3.13.13] 심도별 라돈 및 현장측정 결과



[그림 3.13.13] 심도별 라돈 및 현장측정 결과(계속)

현장측정, 라돈, 주요이온들의 분석결과에서 1차 분석결과와 2~5차 분석결과가 서로 다른 양상을 보이는 것은 관측정이 상부 일부구간을 제외하고 전 구간에 스크린이 설치되어 있고, 양수가 이루어지지 않고 평상시에 사용되는 관정이 아닌 관측용으로만 사용되고 있어 단열구간과 그 외 구간에서 서로 혼합이 이루어져 전 구간에서 비슷한 유형의 수질 특성을 보이는 것으로 판단된다.

○ 심도별 수질 유형 분석

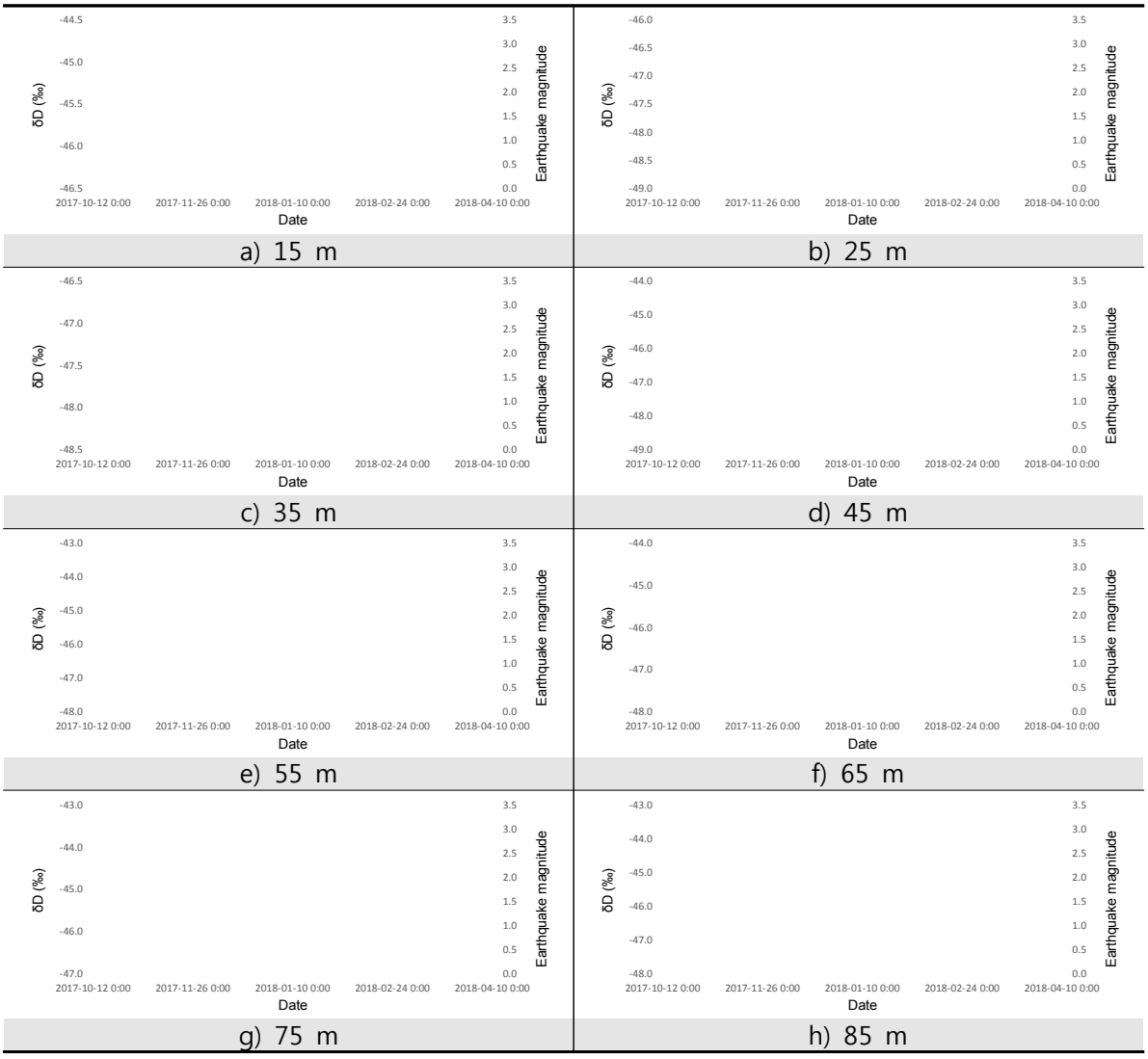


[그림 3.13.14] 관측정 내 수질 유형을 확인하기 위한 piper-diagram

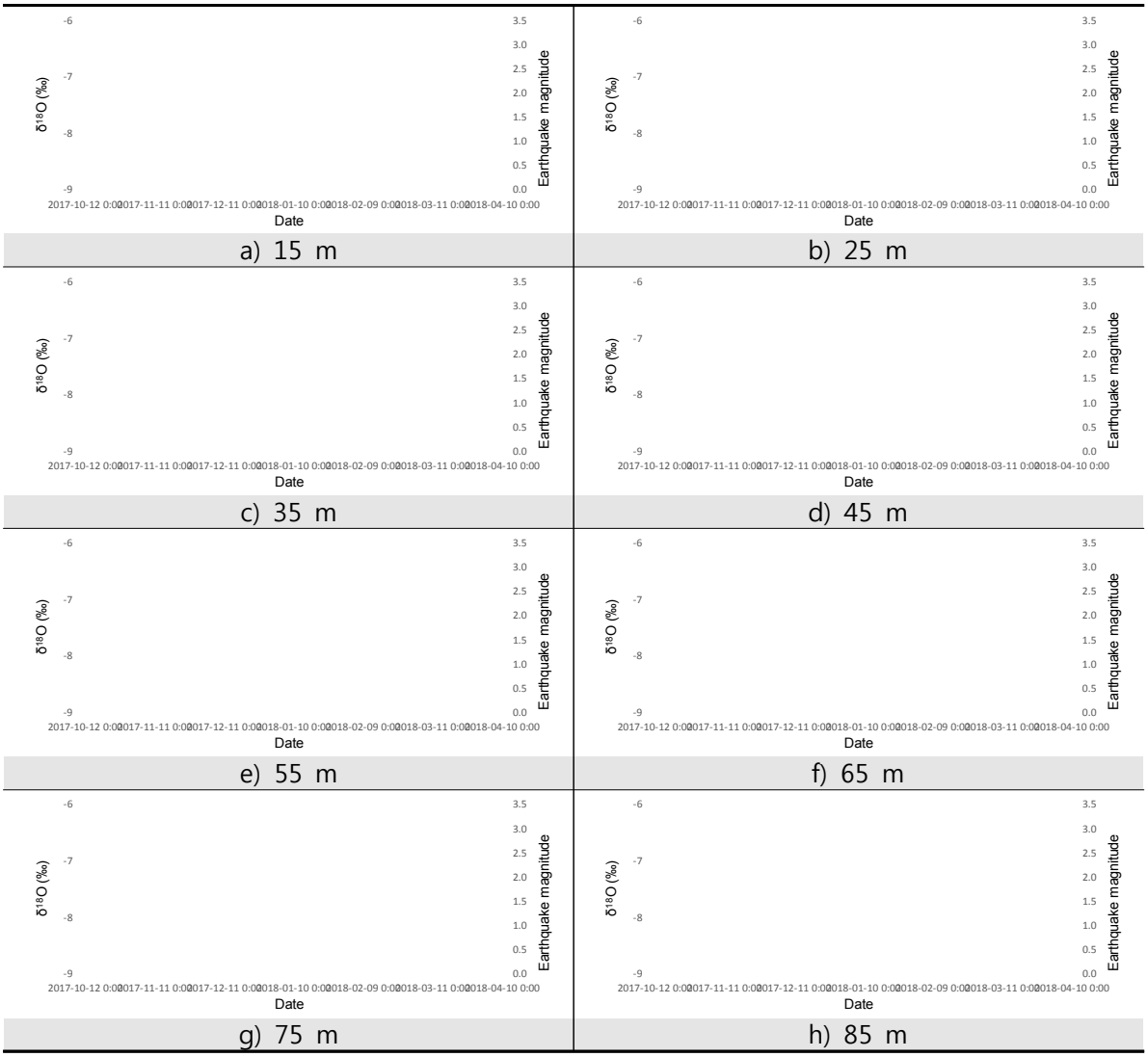
관측정 내 지하수의 수질 유형을 파악하기 위해 piper-diagram을 도시하였으며, 그 결과 Ca-HCO3 유형으로 확인되었다. 관측정 내 지하수는 분석 시기에 따른 수질 유형 차이는 나타나지 않았다(그림 3.13.14).

○ 심도별 동위원소 특성

관측정 내 지하수의 동위원소분석결과와 지진과의 상관관계를 파악하고자 아래 그림과 같이 도시하였다. 도시된 지진 자료는 2017년 10월부터 2018년 3월 사이에 충남지역에서 발생한 지진으로 검토하였다. 관측정 내 산소-수소 동위원소비는 측정 시기, 심도에 따라 증가하거나 감소하는 경향을 보이고 있다. 15~35 m 구간에서는 수소동위원소가 증가하는 경향을 보이는데 산소동위원소는 일정한 값을 유지하고 있는 특징을 보인다. 그 이후 심도에서는 산소-수소 동위원소가 모두 감소하는 경향을 보인다. 이러한 변화 특성이 나타나긴 하지만 지진과의 상관성을 분석하기에는 자료가 많이 부족하다.



[그림 3.13.15] 심도별 수소동위원소비와 지진과의 상관관계



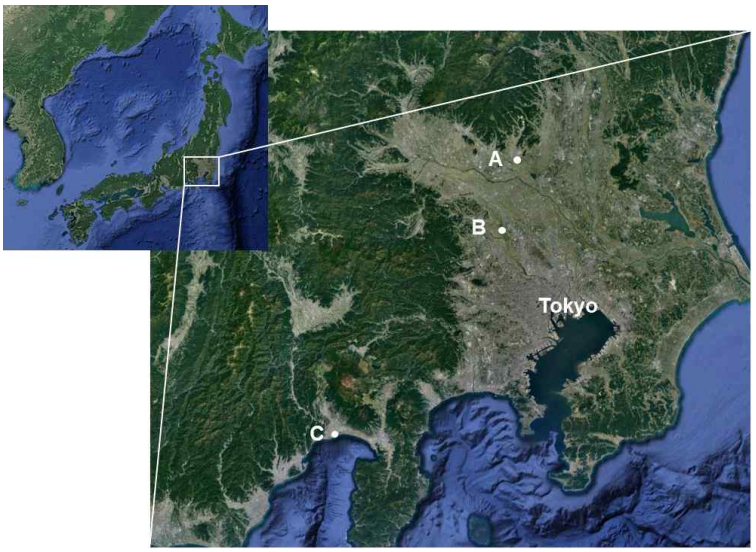
[그림 3.13.16] 심도별 산소동위원소비와 지진과의 상관관계

2) 일본지역

○ 관측지역 선정 이유

지하수위 및 라돈과 지진 발생 간의 상관관계 연구를 위해 지진이 빈번히 발생하는 지역인 일본에 라돈 계측 장비를 설치하고, 운영하여 지진과 지하수위, 라돈 농도 등의 변화 특성, 상관관계를 파악하고자 하였다.

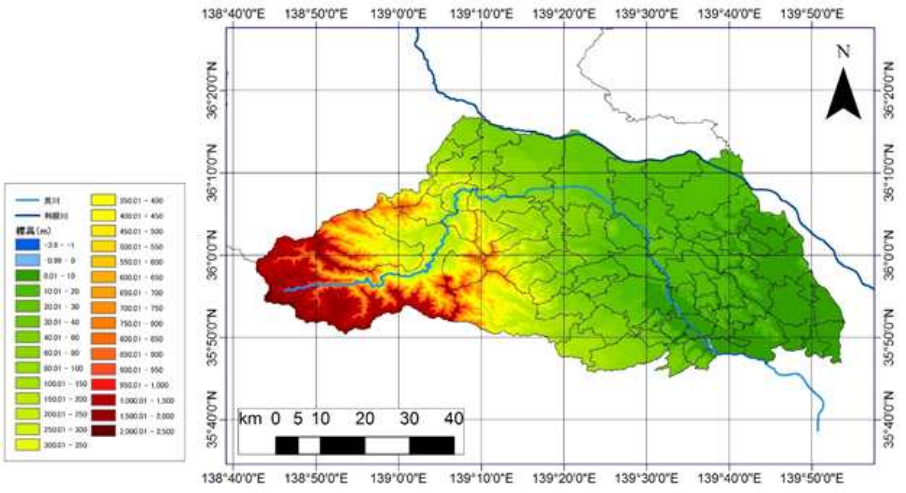
관측지역 선정을 위해 일본 지질조사소에 협조 요청하였으며, 요청을 수락한 일본 지질조사소에서 후보지역 3곳을 추천하고 최종 대상지역을 선정하도록 하였다. 후보지역 중 A 관측소는 군마(Gunma) 현의 카피스(Carpis Co. Ltd) 공장의 공원지역에 위치하고 있으며, 관정 심도는 300 m이다. B 관측소는 사이타마 현의 릿쇼(Rissho) 대학 내에 위치하고 있으며, 관정심도는 1,050 m이다. C 관측소는 시즈오카 현 클린센터 내에 위치하고 있다(그림 3.13.17). 이들 3개 후보지역 중 장심도에 해당하는 B 관측소로 최종 선정하였다.



[그림 3.13.17] 일본 지역 내 관측소 후보지역

○ 관측지역 지형 분포 특성

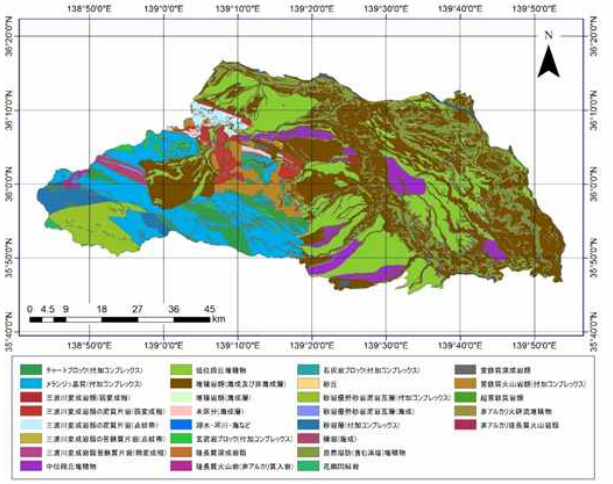
사이타마 현은 간토 평야 서쪽에 위치한 내륙 현에서 현 서부 산지·구릉지가 분포하고 현 중앙에서 현 동부에 걸쳐 고원과 저지대로 이루어진 평야가 있다. 현 동부는 관동 평야에 위치하고 있으며, 전체적으로 저지대 평야가 펼쳐진다(그림 3.13.18).



[그림 3.13.18] 사이타마 현의 지형 분포

○ 관측지역 지질특성

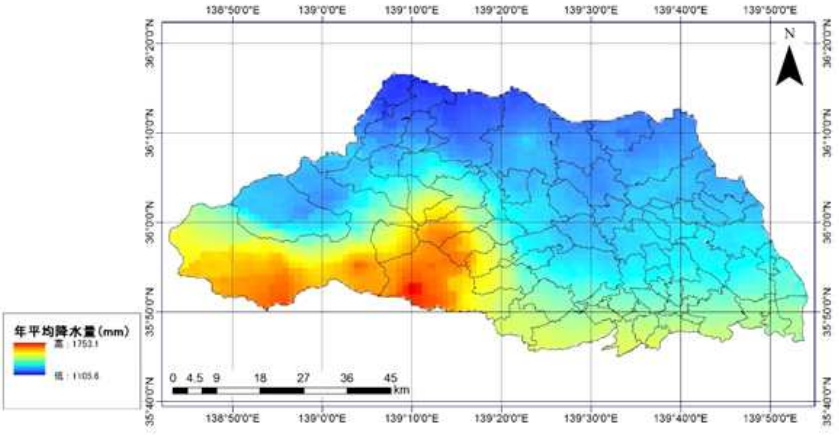
Arakawa Middle Region은 Tertiary Formation을 기초로 삼고 Quaternary stratum의 화강암 자갈층이 퇴적됩니다. 무사시노 양토와 다치카와 양토는 부채꼴의 자갈층 위에 분포한다. 모래자갈층과 점토층, 점토 혼합 모래자갈층, 자갈층 및 양토층이 토대 위에 퇴적된다. 아라카와강의 충적층에는 미사와 자갈이 분포되어있다(그림 3.13.19).



[그림 3.13.19] 사이타마 현의 지질특성

○ 관측지역 기후 특성

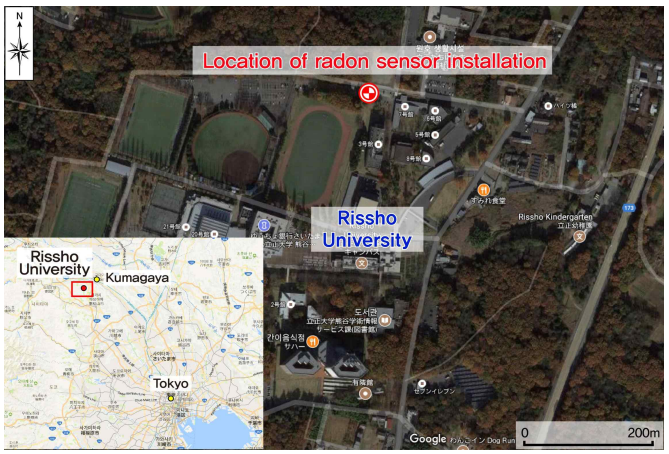
Saitama Local Meteorological Observatory에 따르면 사이타마 현의 기후는 태평양 쪽 기후에 속하며 북서풍 계절풍이 강한 겨울은 햇살이 강하고 공기가 마르며 여름에는 무덥다. 많은 뇌우가 있으며 우박이 많고, 장마와 가을비가 오면 흐리고 비오는 날이 많으며 우기와 같다. 지형, 해수면 등을 감안할 때 대다수가 북부를 포함하여 내륙에 위치하며 남부 평지에는 해안 기상 특성이 추가되고 치치부 지역의 산악 지대에는 유역 형태의 기후와 산 기후가 나타난다. 사이타마 현의 사계절의 변화는 규칙적이고 명확하며, 구마가야의 연간 평균 기온과 연간 강우량은 15.1 ℃와 1286.3 mm로 일반적으로 생활에 적합하지만, 태풍, 번개로 인한 다양한 기상재해가 매년 발생한다. 초봄에는 서리, 5월~7월에는 우박에 주의가 필요하고, 6월~7월 중순까지 장마와 9월~10월 초에 걸쳐 특히 많은 비가 내린다(그림 3.13.20).



[그림 3.13.20] 사이타마 현의 연평균 강수량에 대한 평면도

○ 관측정 계측 시스템 구축

선정된 후보지역인 Rissho University는 Kanto Plane의 북서쪽에 위치하고 있으며, 해당 관측정에 지하수위 및 라돈 계측을 위한 라돈계측기 및 자동수위측정기(CTD)를 설치하여 운영하였다(그림 3.13.21). 계측 장비 설치 시 지하수위는 overflow 상태로 라돈 계측기는 지표하 2 m에 설치하였으며, CTD는 20 m에 설치하였다(표 3.13.6, 그림 3.13.22).



[그림 3.13.21] 일본지역 관측정 위치도



[그림 3.13.22] 관측시스템 설치 모식도

[표 3.13.6] 계측장비 설치 제원

계측장비 설치	관측정 심도(m)	초기 지하수위 (DTWL, m)	계측기 설치심도(m)		측정간격
			라돈	CTD	
2017.11.06	1,050	0 (overflow)	2	20	5분



a) 관정 제원 및 시설 확인



b) 라돈 및 CTD 장비



c) 계측 장비 셋팅



d) CTD Diver 설치



e) 라돈계측기 설치



f) 설치 완료

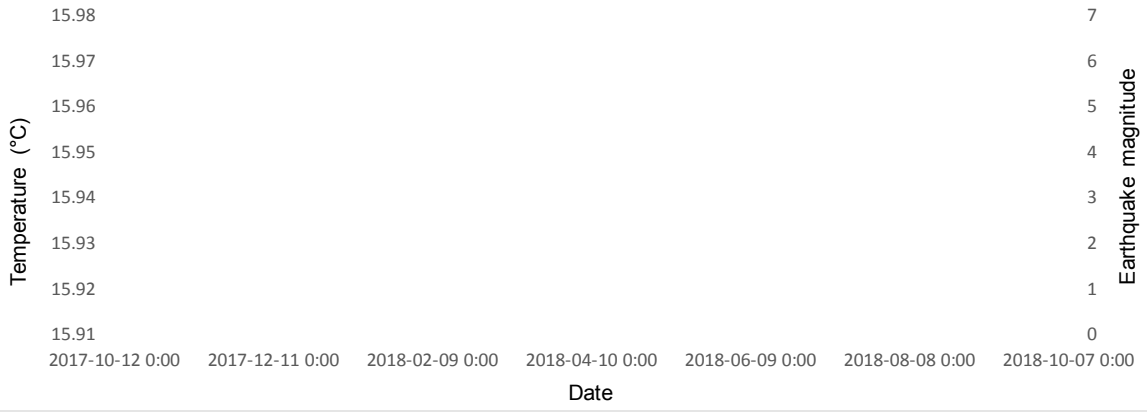
[그림 3.13.23] 라돈 및 지하수위 계측 시스템 구축 현황

○ 관측정 계측 결과

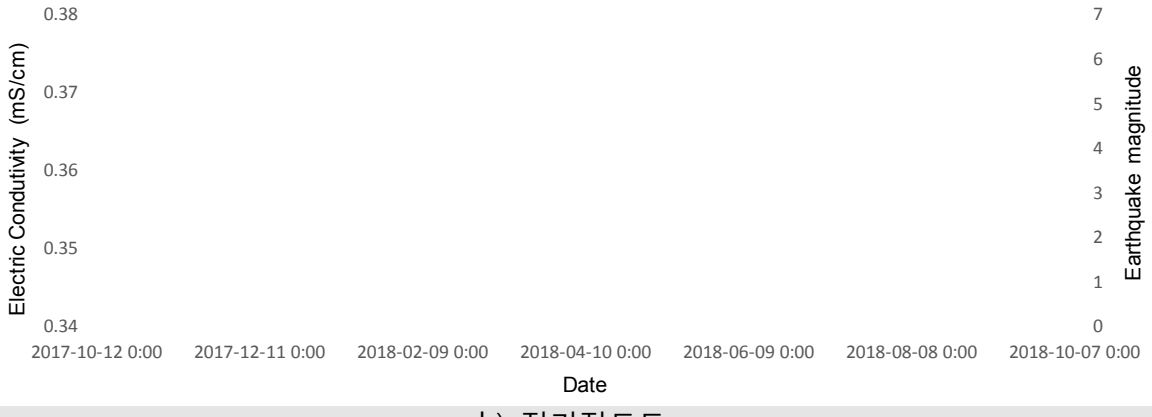
관측결과 온도변화는 관측 시작 이후 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 그 증가폭은 0.05 ℃에 불과해 외부 요인에 의한 온도 변화는 아닌 것으로 판단된다. 지진과의 상관관계를 보이는 이상치도 나타나지 않았다. 전기전도도는 관측 시작 후 일정한 범위의 값을 유지하고 있어 변화가 나타나지 않았다. 지하수위는 2018년 4월 9일 규모 5.8의 시마네현 마쓰에 지진으로 지하수위가 상승한 것으로 나타났다(파란색 박스표시). 4월 9일 전후 강수량은 4월 11일 1.5 mm, 4월 15일 1 mm로 지하수위 상승에 영향을 주지는 않은 것으로 보아 지진에 의한 지하수위 상승으로 보인다(표 3.13.7, 그림 3.13.24). 지하수위가 상승한 시점(4월 9일)을 중심으로 전후의 지하수위 변동특성을 파악하기 위하여 일본 기상청에서 발표한 지진 자료 이용하여 추가 분석을 하였다. 4월 9일 시마네현 지진은 일본 기상청에서는 규모 6.1로 발표하였고, 이 지진이 발생하기 전 4월 8일 18시부터 지하수위가 상승하는 경향을 보인다. 지하수위 변동량이 크지 않지만, 진앙지와 관측소까지 거리가 약 600 km인 점과 강우 발생이 없었던 것으로 보아 지진 전조 현상으로 보인다.

[표 3.13.7] 일본(혼슈) 지진 발생 현황 (기상청 자료)

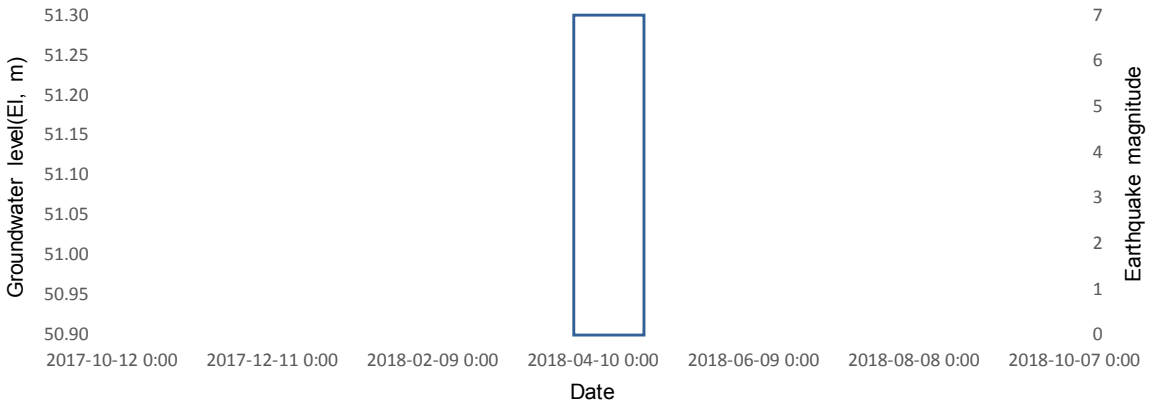
발생시각	규모	깊이 (km)	위도	경도	위치
2017-11-09 16:42	6.1	10	32.20 N	142.50 E	혼슈 지바현 지바 남남동쪽 439km 해역
2017-11-13 7:24	5.7	10	38.00 N	145.10 E	혼슈 미야기현 센다이 동쪽 371km 해역
2018-02-06 5:57	5.7	490	27.10 N	141.00 E	혼슈 시즈오카현 시즈오카 남남동쪽 910km 해역
2018-02-26 1:28	5.7	40	37.50 N	141.80 E	혼슈 미야기현 센다이 남동쪽 118km 해역
2018-03-25 23:37	6.1	40	32.70 N	140.90 E	혼슈 가나가와현 요코하마 남남동쪽 326km 해역
2018-03-30 8:17	5.1	60	36.40 N	140.60 E	혼슈 이바라키현 미토 동북동쪽 12km 지역
2018-04-09 1:32	5.8	10	35.20 N	132.60 E	혼슈 시마네현 마쓰에 남서쪽 50km 지역
2018-05-07 5:01	5.2	100	39.60 N	141.20 E	혼슈 이와테현 모리오카 남남동쪽 12km 지역
2018-05-12 10:29	5.1	10	36.60 N	137.90 E	혼슈 나가노현 나가노 서남서쪽 27km 지역
2018-05-25 21:13	5.1	4	36.90 N	138.50 E	혼슈 나가노현 나가노 북동쪽 39km 지역
2018-06-18 7:58	5.9	10	34.80 N	135.60 E	혼슈 오사카부 오사카 북동쪽 15km 지역
2018-07-07 20:23	6.0	50	35.10 N	140.60 E	혼슈 지바현 지바 남동쪽 72km 해역
2018-08-17 3:22	6.6	-	23.50 N	143.40 E	혼슈 시즈오카현 시즈오카 남남동쪽 1365km 해역
2018-09-02 0:44	5.7	460	28.10 N	140.50 E	혼슈 시즈오카현 시즈오카 남남동쪽 790km 해역



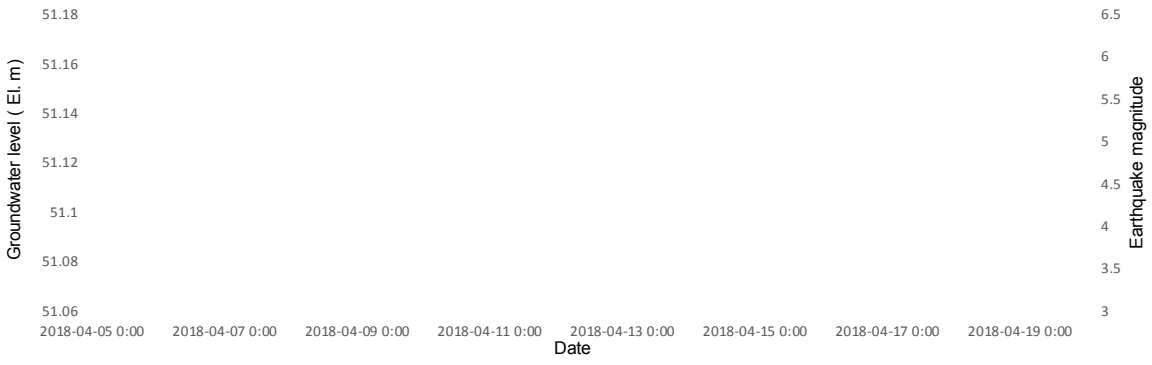
a) 온도



b) 전기전도도



c) 지하수위

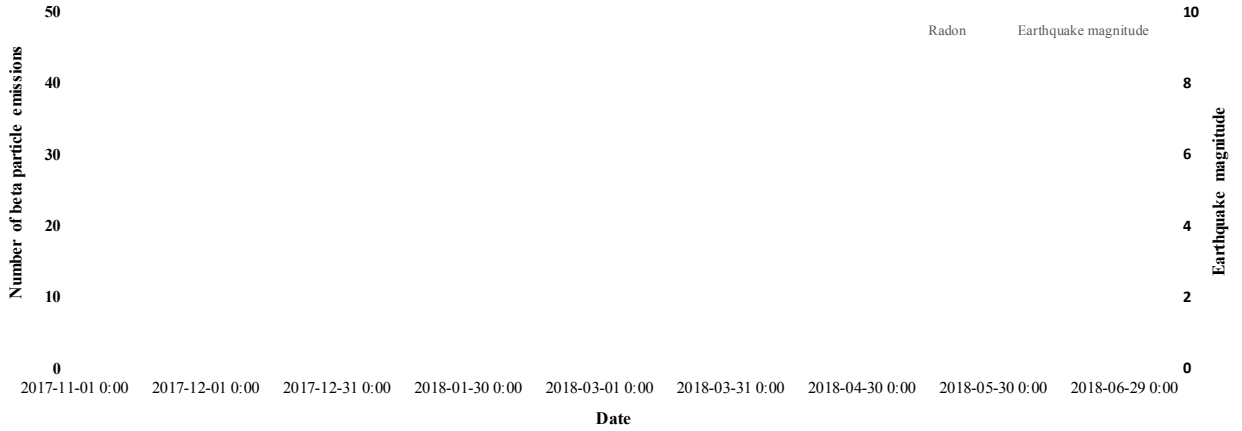


d) 4월 5일 ~ 4월 19일 지하수위 변동

[그림 3.13.24] 관측소 지하수위, 수온, 전기전도도 관측 결과

관측정 내 라돈 관측은 5분 간격으로 계측되었으나, 1시간동안 방출되는 개수를 환산하여 도식화하였다. 관측결과 9~43 count/hr의 범위를 보이며, 평균 25.1 count/hr로 방출되는 것으로 확인되었다. 지진에 의한 라돈 변화는 2017년 11월 13일 발생한 지진으로 라돈 방출 개수가 급격하게 감소한 것으로 확인되었으며, 2018년 2월 6일, 2018년 3월 30일에도 유사한 변화 양상을 보이는데, 이는 지진에 의한 변화로 판단된다(그림 3.13.25).

일본의 지하수 관측정의 지층 구조를 보면, 약 1 km 정도의 미고결 및 반고결층이 발달하고 있어 하부의 암반내에서의 파쇄대로부터의 라돈 방출을 인지하기에는 제한적인 변화가 파악된 것으로 보인다. 일반적으로 심성암류의 화성암에서 라돈이 많이 방출되는 특성을 고려할 때 깊은 충적층 및 반고결층의 발달은 이와 같은 라돈 변화를 지표 부근에서 인지하는 데는 한계가 있어 보인다. 이는 지하수내의 라돈 방출량의 변화를 토대로 지진 계측을 위해서는 깊은 심도의 암반을 대상으로 관측이 이루어질 필요성이 있음을 보여준다.



[그림 3.13.25] 관측소 라돈 관측 결과

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

○ 본 연구의 최종목표는 “지진과 지하수위 변동 및 라돈(Rn222) 방출 특성 활용한 지진 계측 시스템 구축” 이다. 최종목표에 도달하기 위하여 4가지 핵심성과를 설정하여 연차별로 연구를 수행하였다.

○ 핵심연구목표

1) 지진시 지하수위 변동 분석
2) 지진시 라돈 방출 변동 분석
3) 지하수내 라돈222 계측 시스템 활용 가능성 분석
4) 지하수 활용 지진 관측시스템 구축 방안

가. 총괄 연구목표

(1) 정량적 성과지표 달성도

세부 연구 목표	성과지표	목표치	가중치	달성치
1) 지진시 지하수위 변동 분석	지하수위와 지진 상관성 분석결과	국내논문 1건	25%	25%
2) 지진시 라돈 방출 변동 분석	지진과 라돈 상관성 분석	국내논문 1건 국외논문 1건	25%	10%
3) 지하수내 라돈222 계측 시스템 활용 가능성 분석	라돈 연속 자동측정장치 설치 및 운영	국내논문 1건	25%	25%
4) 지하수 활용 지진 관측시스템 구축 방안	자료를 통한 지진관측 시스템 지침 개발	지침 1건	25%	25%
합계			100%	85%

○ 현재 국외 학술지(Hydrogeology)에 “ANN-based prediction of groundwater levels and stream discharges and their changing characteristicsduring2016Gyeongju(ML=5.8) and 2017 Pohang (ML=5.4) earthquakes” 으로 논문 게재 중에 있다.

(2) 연구목표 및 달성도

구분	연구목표	주요연구내용	달성치
주관연구기관 (대전대학교 산학협력단)	연구지역 선정 및 지하수 관측 데이터 수집	- 국내 지진 다발지역 검토 및 연구지역 선정 - 경주 인근 국가지하수관측망 10여개소 이상의 과거 5년간의 지하수위 데이터 확보 - 과거 지진 자료 수집 및 분석 - 지하수 수질 데이터 수집 및 단층 특성에 대한 분석	100%
	지진과 지하수위 상관성 분석	- 확보된 데이터를 활용하여 지진 발생시 지하수위 변동 특성 파악(ANN 모델 활용) 및 상관성 분석 실시 - 지진 발생시 지반 응력변화에 대한 지하수 반응 평가	
	지진시 라돈 방출 변동 분석	- K-Water 협의하 국가지하수관측망 내 라돈계측장치 설치 및 운영	
	신규 관측공 설치 및 계측장치 설치	- 신규 지하수 관측공(충청남도 홍성 충청남도청 내 부지 협조) 설칮 및 계측 설비 설치 운영(수위계, 라돈 자동측정장치 등)	
공동연구기관 ((주)지앤테크)	일본지역 지하수내 라돈 측정장치 설치 운영	- 일본 지진다발지역 수위계, 라돈 연속자동 측정장치 설치 및 운영	100%
	지하수 활용 지진관측시스템 구축 방안	- 지하수위, 라돈 농도 변동 계측을 통한 지진발생지역 및 예상지역의 지진계측 지침 개발	

2. 관련 분야 기여도

○ 본 연구의 지진 발생 및 예상 지역의 지하수위 및 라돈 방출 특성을 활용한 지진 계측 시스템 구축을 통한 지진 예측 연구의 확대 가능성, 본 연구에서 사용되는 라돈 연속자동측정 장치와 같은 지하수내 라돈 연속 측정 장치의 기술 경쟁 촉진에 기여하며, 지하수 활용 관측시스템의 시범 설치 운영을 통한 지진관측체계의 활용 가능성 진단으로 향후 지진관측체계의 확장에 기여한다.

○ 본 연구를 통한 지진계측 기법 및 관측체계를 활용하여 국내뿐만 아닌 국외 지진 발생 지역까지 확대하여 지진 관측시스템 설치 및 운영함으로써 향후 계측 산업 분야의 이익 창출을 기대한다.

○ 본 연구를 통해 구축된 지진 관측 시스템을 활용하여 지진에 신속히 대응할 수 있는 의사결정 기술을 확보하고 정부의 지진관측체계에 지하수를 활용한 시스템을 구축할 수 있는 지침을 제공함으로써 향후 지진관측체계 구축에 활용함으로써 지진발생시 보다 빠르게 각 관측소 및 기상청과 연계하여 국민에게 통보하게 되며, 이를 통해 국민 불안감 해소와 긴급대응 지원 system을 통한 피해 예측 및 최소화 방안에 기여한다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구개발성과의 활용방안

○ 최근 지진 다발 지역인 경북 경주 근처의 국가지하수관측망 데이터를 활용하여 과거 지하수위 데이터를 토대로 지진 발생 전, 후의 지하수위 변동 및 라돈 변동 특성을 평가할 수 있다. 연구를 바탕으로 최적의 지진 관측 시스템을 설계하여 추후 지진 발생예상 지역에 설치 운영이 가능 할 것이라 판단된다.

○ 기존 국가 지하수 관측망은 전국적으로 386개소가 설치되어 운영 중에 있다. 따라서, 추후 지진 관측 시스템을 전국의 지진 발생 지역 및 지진 발생 예상지역에 설치 가능하므로 국내 전국 규모의 지진 관측 시스템으로 활용가능 할 것이라 판단된다.

○ 본 연구의 핵심 성과인 지진과 지하수의 상관성에 대한 분석을 통하여 응력의 분포와 지하수위 변동 특성을 규명하였으며, 지점별 지하수위 상승/유지 특성을 해석하였으며, 이 결과는 동남권 지역에서의 지진 응력 해석, 활성 단층 조사, 토양의 액상화 등의 연구에 도움이 될 것이다.

○ 동남권 일대 지하수 관측정내에 분 단위의 지하수위, 전기전도도, 온도 및 라돈 자동측정이 가능토록 시스템을 구축하여, 향후 추가적인 지진 발생시 이전 및 이후의 특성을 신속히 파악할 수 있도록 연구 기반을 갖추었으며, 추가적인 연구가 이루어진다면 예측 가능성에 대한 연구 수행시 계측 시스템의 지원, 활용이 가능할 것이다.

○ 미국 및 일본 등 다수의 해외 연구를 통해 지진 발생 시 라돈함량이 증가 및 감소하는 현상을 통해 상관관계를 보이는 것으로 파악하고 지진예측 도구로 활용하여 지진감지 가능성에 대해 많은 연구가 수행되었으나 대부분의 라돈 측정 방식이 얕은 심도의 지하수 중 수질 시료를 채취하고 일부는 토양 가스 라돈 측정을 통해 분석된 사례들로 지하수내 직접 측정 가능한 계측사례가 없어 기존 라돈 계측 방식의 한계점을 뛰어 넘은 연구개발성과라고 할 수 있음.

○ 이에 파쇄대가 발달한 심부 지하수내에 단층 패쇄 압축에 의한 지하수이동 특성과 균열대 주변설치 가능한 라돈측정 장치 개발 등 다양한 후속연구 등을 통해 자동계측을 통한 지진 감시 체계로의 활용성이 극대화 될 것으로 판단됨.

2. 기대효과

가. 기술적 측면

○ 국내 지진 발생지역 및 발생 예상 지역 지하수위 및 라돈 방출 특성을 활용한 지진 예측에 대한 연구 확대 가능성에 기여한다.

○ 기존 수위측정 장치의 경우 시간 단위 측정으로 지진에 대한 지하수위 변동성을 정확히 파악하기 어려운 단점이 있다. 본 연구에서 사용되는 전자식 수위측정장치 같은 지진에 대한 지하수위 변동 특성을 파악하기 위한 지하수위 연속측정 장치의 기술 개발 가능성이 있을 것으로 본다.

○ 본 연구에서 사용되는 라돈 연속자동측정 장치는 기존 라돈 측정 장치와는 달리 지하수내에서 직접 측정하며 계측시간을 기존 30분~1시간에서 수 분 이내로 단축시켰다. 연구 결과의 신뢰성을 바탕으로 지진계측 시스템이 운영되면 라돈 연속자동측정 장치의 기술 개발에 도움을 줄 것이라 본다.

○ 베타 입자를 검출 할 수 있는 Semiconductor detector 타입 센서의 개발로 센서 표면이 지하수에 노출되도록 배치하는 방식의 계측기 개발로 수질시료채취를 통한 라돈 농도 측정의 제약적인 방법에서 즉시 측정 가능한 라돈계측기를 개발함으로써 지진 전조 증상 평가로 활용될 계측장비 개발에 기여하였다.

○ 본 연구에서는 지하수위 3m하에서 측정가능한 센서부의 한계점을 보이며 향후 후속연구를 통해 암반구간 내 100 심도에서 압력을 견길 수 있는 센서 개발, 계측데이터의 원격 수신 시스템 개발 등 과 연계하여 지층내 파쇄대 특성을 고려한 라돈 방출 특성 분석 방법을 활용한 실시간 지진 감시 체계 기술 개발이 추가적으로 필요할 것으로 본다.

나. 경제적·산업적 측면

○ 본 연구를 통하여 신뢰성 있는 지진계측 기법 개발을 통해 국내외 지진발생 및 발생 예상 지역에 지진 관측 시스템 설치 및 운영으로 산업분야 이익 창출을 기대한다.

○ 본 연구에서는 지하수내에 설치된 라돈 측정 장치로 라돈 농도를 계측하게 되는데 계측된 데이터는 추후 On-line 으로 전송시켜 실시간 관측이 가능하게 함으로써 데이터 관리의 편리성을 증가시키고 뿐만 아니라 비용 절감에도 효과적으로 작용될 수 있으므로 추후 실용화 가능성에도 기여한다.

다. 사회적 측면

○ 지진 관측 시스템 설계를 통해 향후 지진에 신속히 대응할 수 있는 의사결정 기술을 확보하는데 기여한다.

○ 정부에서 2019년까지 중기 계획으로 지진방재 종합계획이 진행 중이며, 본 연구기술을 활용하여 체계적인 지진 관측시스템과 대응 및 대책 시스템 구축에 기여한다.

○ 본 연구를 통한 지진계측 시스템으로 지진 발생 전 지하수위 및 라돈 농도 변동 분석을 통해 기존 보다 빠르게 각 관측소 및 기상청과 연계하여 국민에게 통보하여 국민 불안감 해소와 긴급대응 지원 System을 통한 피해 예측 및 최소화 방안에 기여한다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 전문가 자문의견 수집

가. 배경 및 목적

지하수를 활용한 지진 관측 방안 및 기술 개발방향 관련 해외 기술 자문

나. 자문 내용

1) JpGU2018 강연정보(“난카이(南海) trough 거대 지진 발생 지역 육지 최전선과 그 후방에서의 최근의 지하수 변동”)

지하 암반에 불균형의 힘이 가해져서 전단응력이 높아지고, 전단파괴(지진)가 발생한다. 전단응력이 집중하는 주변에서는 암반에 응력이 나타난다. 여기서는, 수축장과 팽창장이 서로 이웃하면서 생성된다. 대지진의 장에서는 아마도, 다수의 연결된 비교적 소규모의 응력의 장으로 구성된다. 전단응력이 암반의 강도를 넘어 선 수준으로 증대했을 때(임계상태), 어딘가의 응력장의 전단파괴가 방아쇠가 되어 대지진으로 확대된다.

대지진의 준비과정에 있어, 미소 파쇄대군으로부터 형성된 유체이동의 통로가 존재하면, 지하 암반의 수축영역(압력상승)과 팽창영역(압력강하)의 형성에 따른 간극 유체압 변화에 따라, 지표로 향해 상승 유체의 증가나 감소가 일어난다. 심부 유체는 고온이므로, 상승 심부 유체가 천층 지하수에 혼입하면, 지하수온을 상승시킨다. 또, 이동유체의 양의 변화에 따라 수온변화가 일어난다(츠쿠다 등, 2005).

비영리사단법인인 ‘지하로부터의 조짐을 측정하는 모임’에서는 여러 개소에 지하수온 또는 지하수온+지하수위 관측을 통해 기초 자료를 제공하고 있다. 자분정인 NK에는 고정밀도 수정온도계, 그리고 OT에도 이를 설치하여 관측했으나 2014년에 고장으로 현재는 백금 저항체 온도계를 설치, 그 이후 NG등에도 이것이 설치되어 있다.

OT의 수온(깊이 30 m에서의)은 평균 상승률 24 m℃/년의 단조로운 증가가, 2009년 8월 11일의 츠루가만 지진(M 6.5)이후, 44 m℃/년으로 상승, 2011년 3월11일의 토호쿠 지진(M 9.0) 경부터, 이전의 상승률로 돌아가, 2012년 말부터 상승이 완화되어 왔다. 수온은 그 후 2년간 거의 일정하다가 2017년의 봄부터 급상승으로 전환하였다.

NK(시즈오카 지역)의 수온은, 2008년까지는, 14 m℃/년~7 m℃/년의 상승이었으나, 그 후 상승률은 둔화, 2008년 9월경부터 -40 m℃/년의 율로 하강으로 돌아섰다. 2009년의 츠루가만 지진의 전조현상의 하나로 생각된다. 게다가 그 지진 이후, 하강률이 커져서(-117 m℃/년), 2011년8월1일의 츠루가만 지진(M 6.2)이후, 더욱 하강률이 증가했다. 그 후, 2013년 5월 하순부터 상승(66 m℃/년), 2015년에 들어 상승은 누그러져서, 2016년 10월부터 하강으로 돌아섰다.

NG(하마마츠 시)에서는, 2016년까지 하강 경향이었으나, 2017년에 들어 수온급상승으로 전환했다.

2) 지진 발생 전의 지하수변동....지각 변동을 잰다

○ 공내 계측의 문제점과 화학 계측에 의한 해결

수압이나 온도라고 하는 물리계측 만으로는 물의 유입량은 물론, 그 유무에 관해서 조차도 정보를 얻을 수 있는 보증은 없다. 게다가, 그 물이 어디로부터 오는가 하는 점을 물리계측만으로 고찰한다는 것은 대단히 어렵다.

거기서 착안되고 있는 것이 화학계측이다. 화학성분을 적절히 선택하면, 그것은 물의 유입에 대한 대단히 고감도의 지표로 나타난다. 해수에는 대부분 존재하지 않지만, 암석권으로부터 탈수되어 오는 물에는 다량 함유될 것으로 예상되는 성분은 많다. 특히 산화, 환원 상태의 변화에 민감한 성분(Fe나 CH_4)이나, 수명은 짧으나 암석 속에서의 미소 파쇄를 예민하게 반영하는 성분(Rn이나 H_2) 등은 유용한 지표로 나타날 가능성이 높다.

○ 각종 화학 센서의 의의와 정보량(유용성) 및 관측공 또는 해저 설치형에서의 연속관측 실현 가능성 일람

項 目	流体移動に対する感度	情報量（有用性）	「海底観測」実現の可能性	コメント
塩濃度（電気伝導度）	★	★★★	★★★★	安定度・実績十分で簡便。しかし流体移動に対する感度低い。
ラドン（放射線）	★★★★	★★★	★★★★	岩石破壊の高感度指標で実績もそこそこある。しかし堆積物や岩石が主要放出源であり，掘削孔観測ではその補正方法が悩ましい。
Eh	★★★	★★	★★★★	還元性流体の高感度指標で実績有り。酸素・硫化水素を測定しているのと意味は同じ。
濁度	★★★	★★	★★★★	安定度・実績十分で簡便。
酸素	★	★★	★★★	感度低い。長期安定性は不安。
pH	★★	★	★★★	何を表しているかよくわからない
硫化水素	★★	★	★★	保存成分ではないため指標としてはあまり有用でない。
Fe・Mn	★★	★★	★★	感度は高い場合と低い場合の両方がありえる。長期測定には改良必要。
栄養塩	★	★★	★★	生物的環境の指標。でも感度は低い。
メタン	★★★★	★★★	★	現在あるものは水深2000メートルまでしか使えず応答性も悪い。改良必要。
水素	★★★	★★★★	X	岩石破壊の高感度指標だが，現場観測は無理。工夫すれば可能かもしれない。
希ガス同位体比	★★★	★★★★	X	流体の起源考察の最高の指標だが，現場観測は無理。
メタン炭素同位体比	★★★★	★★★★	X	流体の起源の良い指標だが現場観測は無理。
水同位体比	★★★	★★★★	X	流体の起源の良い指標だが現場観測は無理。

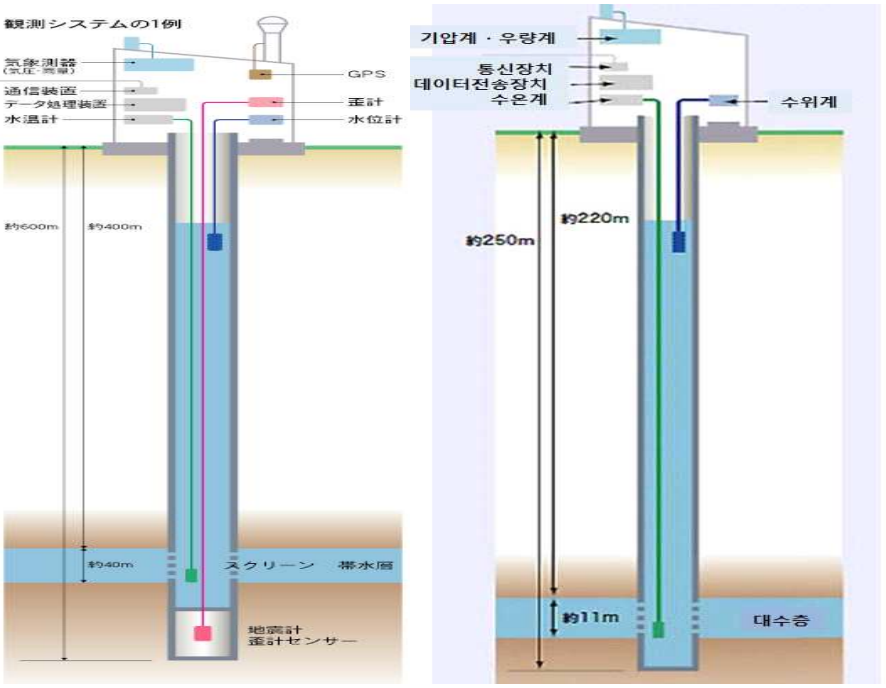
＊完全に角皆の独断と偏見に基づいています。関係者の皆さん，お気を悪くされたらご免なさい。意義や可能性の高い物を最高五つ星で表現。

- 염농도 (전기전도도) : 안정도와 실적 충분하고 간편하나 유체 이동에 대한 감도가 낮음.
- 라돈 : 암석 파괴의 고감도 지표로서, 실적은 꽤 있음. 그러나 퇴적물이나 암석이 주요 방출원으로, 굴착공에서의 관측에서는 그 보정 방법을 고민해야 함.
- Eh (산화환원전위) : 환원성 유체의 고감도 지표로서 실적이 있음. 산소나 유화수소를 측정하는 것과 같은 의미임.

3) 토카이지진 예지를 목적 지하수관측

○ 지진 예지를 위한 지하수 관측

지하수 관측은 심도 150~340 m의 심정호에서 행하고 있다. 관정 가까이에는 관측 장옥이 설치되어, 지하수위, 지하수온 이 외, 기압과 우량 등도 계측하고 있다.

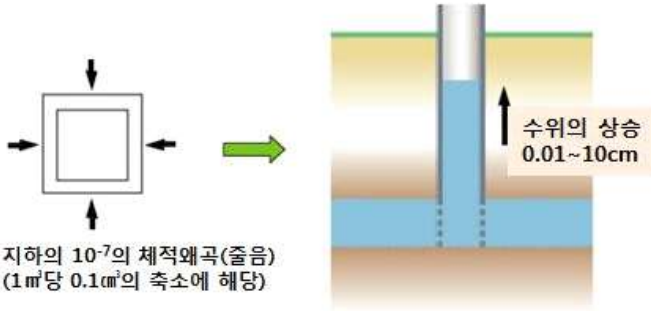


[그림 6.1.1] 관측 시스템의 한 예

역시, 지하수위는 기압, 지구 조석 및 강우에 의해서도 변화한다. 우리는 최신의 통계학적 방법을 통해 관측된 지하수위로부터 기압, 조석, 강우 등의 변화를 제거하는 방법을 개발하였다(松本, 1992, 松本 등, 2003). 관측한 데이터가 이상이 있는지의 여부를 판정할 때에는 상기의 데이터 해석 이후의 지하수위를 이용하고 있다.

○ 응력 변화와 지하수위 변화와의 관계

지면이 신축(伸縮)함으로써 지하수위가 변화한다. 예를 들면, 아래 오른쪽 그림처럼, 지하수가 있는 심도에서 체적이 1 ㎥ 당 0.1 ㎤ 줄어든 경우, 지하수위는 장소에 따라서 0.01~10 cm 변화한다(Roeloffs, 1996). 이 관계를 사용하여, 지하수위로 지하의 응력을 측정한다.

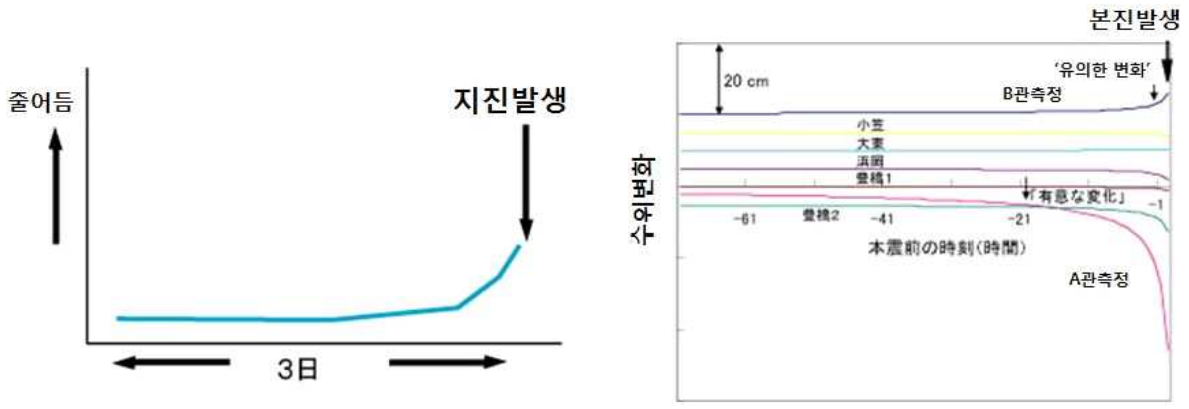


[그림 6.1.2] 응력 변화와 지하수위 변화

○ 토카이 지진 전에 예상되는 지하수의 움직임

최근의 연구(Kato and Hirasawa, 1999)에서, 토카이 지진의 전에, 지하 깊이 있는 위쪽과 아래쪽의 플레이트 사이에 박리(얇게 떨어짐)가 일어나, 지진을 발생시키지 않는 부드러운 미끌림(전조 미끌림)이 일어날 가능성이 있다고 하는 것이 알려져 왔다. 이러한 지하의 움직임이 있는 경우, 전조 미끌림이 일어나는 장소의 직상부에서의 지각 변위의 데이터가 오른쪽 그림과 같이 될 것으로 예측되고 있다.

전조 미끌림이 일어난 경우에, 우리가 관측하고 있는 관정의 지하수위가 어떠한 변화로 되는지 컴퓨터로 계산한 하나의 예가 왼쪽 그림이다. A 관측정의 바로 밑에서 진도 6.5의 지진에 상당하는 전조 미끌림이 일어난 경우, A 관측정의 수위가 감소하여, B 관측정의 지하수위가 상승한다. 기상청의 체적 응력계(歪計)와 같은 모양의 '유의한 변화'가 관측되는 것은, 본 관측정에서 본진 발생 전의 20 시간 전, 위의 B 관측정에서 2 시간 전으로 관측된다. 지하수위의 '유의한 변화'가 관측된 경우, 토카이 지진에 관련된 정보를 발표할 때 참고 데이터로서 사용될 수 있게 된다.



[그림 6.1.3] 지진 발생에 따른 수위변화

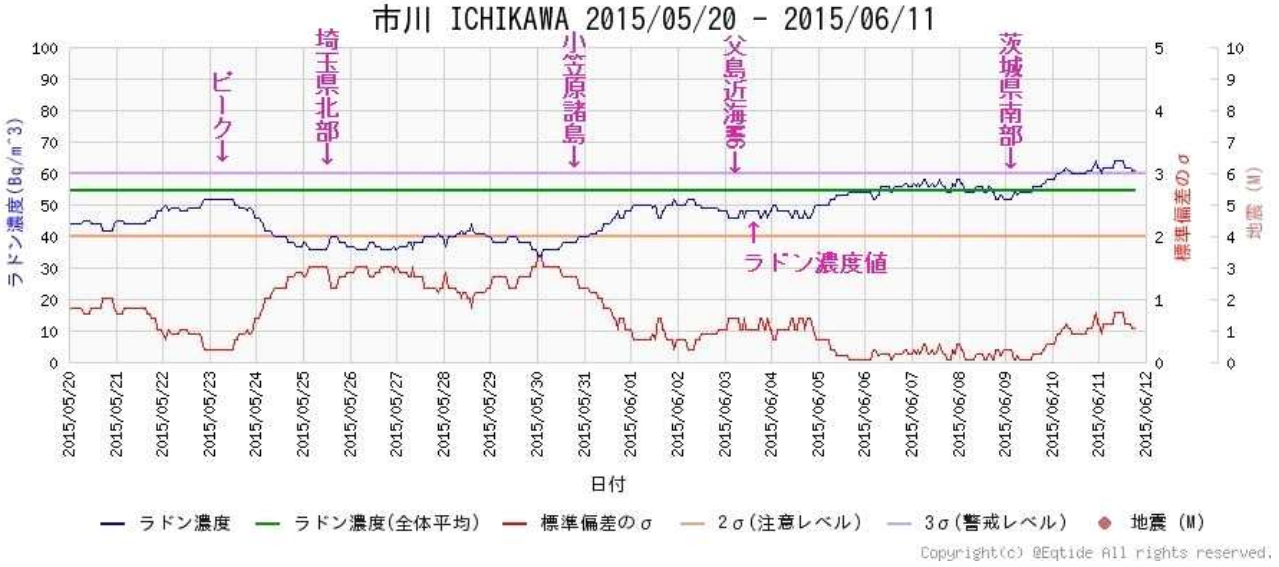
4) 거대지진 전조20리스트+지하수 수질변화+라돈농도그래프+지진운 등

○ 지진 전에는 지하수 수질이 변한다

스웨덴의 스톡홀름대학의 연구자들은, 아이슬랜드에서 지하수의 화학성분을 5년간 관측하여, 발견한 바 있다. 2012년과 2013년에 일어난 M 5.0를 넘는 규모의 대지진의 직전 (4~6개월 전)에, 성분 조성에 현저한 변화가 있었다는 것이다. 지각변동에 따라, 우물물이나 해수의 수위 변화도 중요하다는 것은 말할 나위 없다. 온천에서는 탕의 양의 변화도 나타났다.

○ 라돈의 농도 그래프

지진 발생 전에 지하수 속의 라돈 농도가 상승하여, 그 이후 하강하는 이상의 값이 수렴되어 발진(發震)하게 된다. 큰 지진이 발생한 날은, 핑크색 문자로 그 의미를 추가하고 있다. 그림 6.1.4를 보면, 최초로 5월 23일 경에 우선 피크가 있고, 오렌지색 라인의 주의점을 하회하여 수렴한 후, 5월 25일 사이타마현 북부 M 5.5의 지진이 있었다.



[그림 6.1.4] 지진 발생에 따른 라돈변화

5) 기술 종합 제시

1. 지하수위

1) 작은 파쇄대로 되어 있는 지하수의 이동 통로가 존재하는 경우, 지하 암반의 수축과 팽창으로 인한 유체압의 변화로 지표를 향해 상승하는 유체(지하수)가 증가하거나 감소한다.
2) 피압지하수의 개념으로서, 지반 변위로 인한 체적 응력이 변화하여 수위에 영향을 미친다. 천층 지하수 같은 자유면 지하수의 개념으로는 체적 응력 변화에 대한 감도가 낮다.
3) 본진의 발생 전, 미세 응력이 변화하면, 대수층 내 압력 변화에 따라 관측정 내 지하수위가 변화한다.
4) 수위 센서는 수위의 변화를 민감하게 검지할 수 있는 지점에 위치시킨다.
5) 되도록 상 하위 암반에 의해 차단되는 피압지하수의 파쇄대 구간에 screen을 위치시킨다.

2. 지하수온

1) 심부의 지하수(유체)는 고온이므로 상승하는 지하수가 위층의 지하수에 혼입되면 지하수온을 상승시킨다.
2) 이동 유체의 양에 따라서도 수온 변화가 나타난다.
3) 현재 일본의 관련단체의 관측공을 통한 수위 및 수온 관측 기초자료 제공에 있어, 백금 저항체 온도계가 설치되어 있다.
4) 온도계 센서는 피압 지하수의 유입부(screen)에 위치시킨다.

3. 지진계

1) 강진계 : 피해를 가져올 정도로 강한 진동을 계측하기 위해 사용되는 것으로, 진도(震度)는 강진계의 일종인 진도계로 관측된 것이다.
2) 고감도 지진계 : 미소한 지진에 의한 몸이 느끼기 어려울 정도의 미미한 진동을 계측하는데 사용된다.
3) 광대역 지진계 : 느린 진동을 계측하기 위해 사용되는 특수한 지진계로서, 대지진, 진원에서의 단층의 움직임, 지각의 활동(즉, 파괴의 과정) 등 연구에 사용되고 있다.
4) 지진계는 지진 외 외부의 인공적인 진동파를 감지하지 못하게 유의해야 한다.

4. 기타 계측 : 고도의 조사, 연구를 위해 필요한 장치를 설치한다.

1) 응력계 : 수평응력계, 경사응력계, 수직응력계
2) 경사계
3) 자력계
4) 방위계

5. 지진 종합관측용 설치공

1) GPS는 기본적으로 설치된다.
2) 지표 직하부 관측공 : 지진계(강진계) 설치
3) 50m 이내의 천심도 관측공 : 수위계, 수온계, 지진계(고감도 지진계) 설치
4) 200~300m의 중심도 관측공 : 수위계, 수온계, 지진계(고감도 지진계) 설치
5) 500m 이상의 고심도 관측공 : 수위계, 수온계, 지진계(목적과 대상에 따라 고감도 지진계 또는 광대역 지진계), 공내응력계, 공내경사계 설치
6) 한 관측 시설에 서로 다른 깊이의 관측정을 굴착하여, 수위계, 수온계, 지진계, 응력계, 경사계 등 필요한 장치를 설치하기도 한다.
7) 관측공의 피압지하수 유입부인 screen 설치 구간을 결정하기 위한 조사에 Hydrophone VSP 탐사를 수행한다.
8) 수위계와 수온계를 제외한, 일련의 계측 장치 세트는 수밀 내압성의 스테인레스(STS 316 이상)에 봉입하여 관측정의 바닥에 위치시킨다. 이 때 시멘트를 넣어 굳히거나 원격 조정이 가능한 암(arm)장치를 통해 공벽에 압착시킨다.

6. 방사능 및 화학적 계측

1) Fe, CH_4, Rn, H_2가 유용한 지표가 될 수 있다.

2) 지진에 의한 지각의 응력이 클수록 He의 양이 많다.

3) 라돈 농도가 지진 전에 상승하는 경향이 있다.

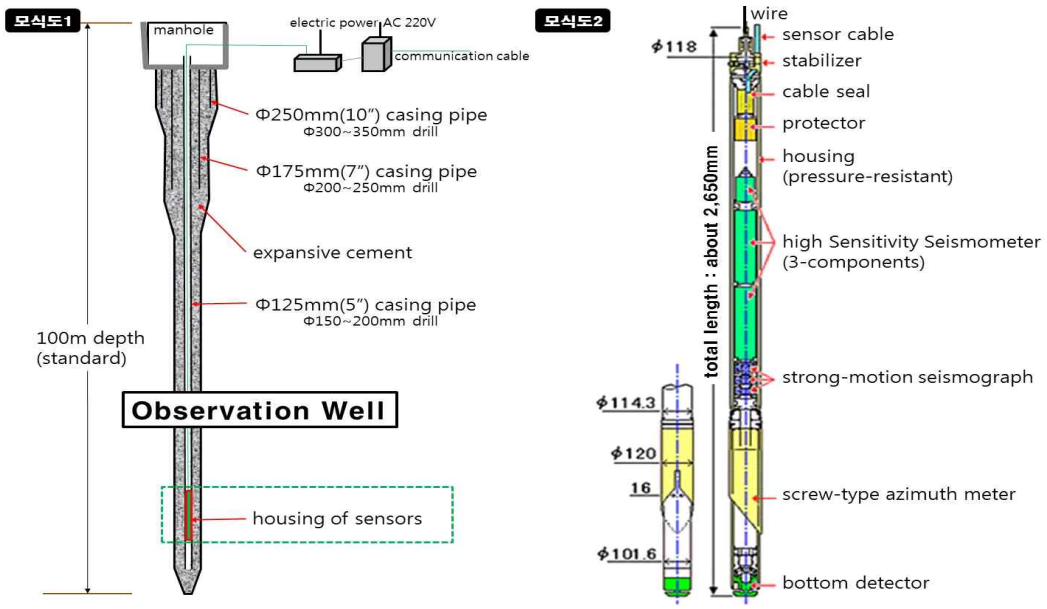
4) 현재의 자료로 라돈을 현장에서 정밀하게 바로 계측할 장치는 확인되지 않음으로써, 라돈을 함유한 지하수의 샘플링 장치(특수 미니 모터 펌프 형태 : 100 m 심도까지는 C&H 회사에서 수입 보유하고 있는 Bladder pump와 같은)로 샘플링 후 바로 실내에서 별도 분석 장치로 보내져야 한다.

7. 제언

1) 다음의 7 종류의 모식도 중에서, 모식도 2, 4, 5, 6 은 지진과 관련하여 내륙 지각 활동이나 해저 trough의 지각 활동의 사전 예지 조사에 응용되고 있는 것으로 참고할 구조 및 설비이다.

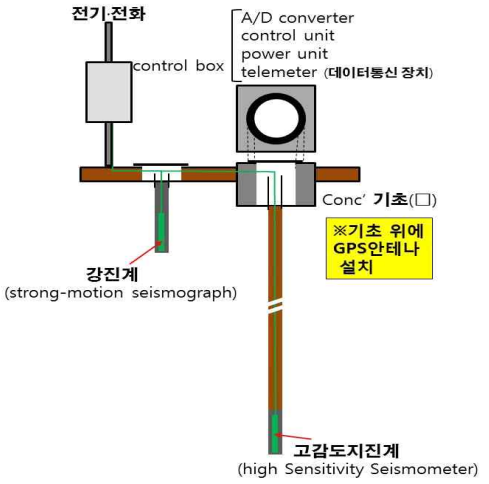
2) 기본적으로는 모식도 7을 표준 기본도로 하여, 모식도 1과 3의 실 예를 참고하는 것이 바람직하다.

3) 라돈이나 헤륨 분석을 위해 지하수 샘플링을 하는 경우, 가능하면 피압 대수층이 있는 screen 구간에서 샘플 채취하는 것이 좋은데, 온도계가 설치되어 있는 경우, 온도의 미소한 변화를 가져올 수 있다. 그러므로 이를 감안하여 샘플링(별도 관측공 또는 변화의 사전 예지 등)할 필요가 있다.

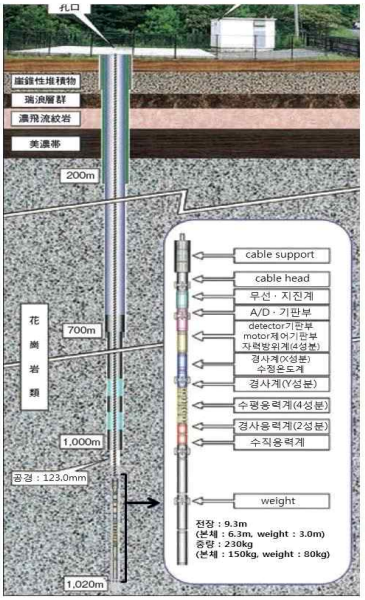


[그림 6.1.5] 지하수를 활용한 지진 관측 방안 모식도

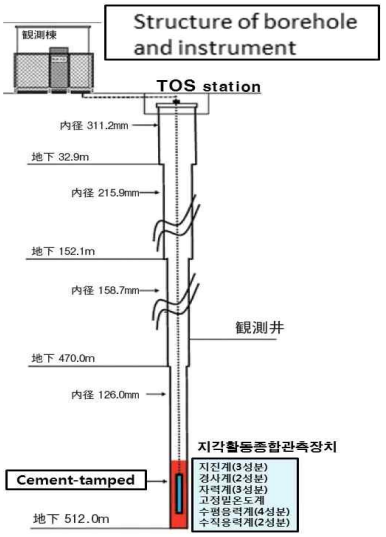
모식도3



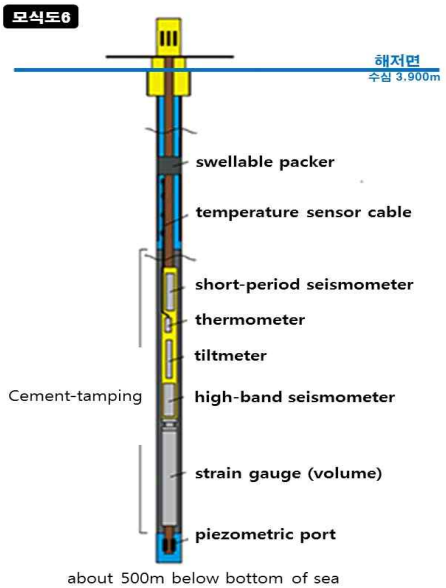
모식도4



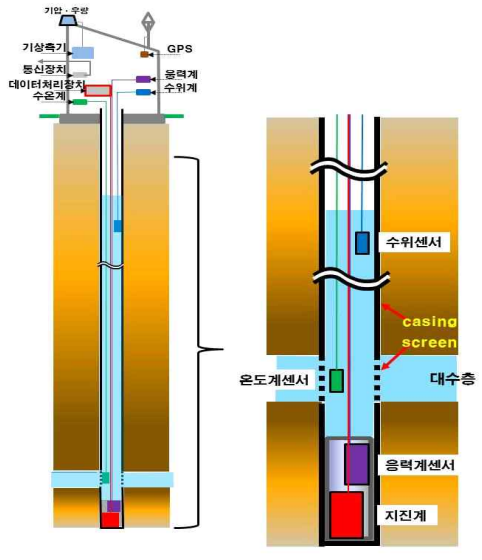
모식도5



모식도6



모식도7



[그림 6.1.5] 지하수를 활용한 지진 관측 방안 모식도(계속)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		O
결정 사유	□ 본 연구는 지진에 따른 지하수위 및 라돈 방출 특성을 분석하여 지진계측으로써의 활용성을 평가하고 지진계측시스템 구축 방안을 설립하여 지진계측 기술 발전에 목적이 있으므로 공공적 성격이 강함. □ 이와 같은 과제 성격에 부합하도록 개발된 기술, 지침 등은 다양한 연구계 및 산업계 전반에 널리 전파하여 활용할 수 있도록 하고 참여기업의 기술 권리가 침해되지 않는 범위 내에서 연구 성과를 공개 할 필요가 있음. □ 따라서, 본 연구 보안등급은 공개 가능한 일반과제로 분류함.	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	PIN 포토다이오드를 활용한 지하수내 라돈 베타입자 측정장치의 적용성 평가	대전대학교 산학협력단		대한지질학회		2017.12.08	단독 사사	
2	논문	2016년 경주 지진시 지하수위 변동의 시공간적 분포 특성	대전대학교 산학협력단		대한지질학회		2018.05.08	단독 사사	
3	논문	2017 포항 지진시 단기간 지하수위 변동 및 하천 유량 변화 특성	대전대학교 산학협력단		대한지질학회		2018.10.08	단독 사사	
4	논문	ANN-based prediction of groundwater levels and stream discharges and their changing characteristicsduring2016Gyeongju (ML=5.8) and 2017 Pohang (ML=5.4) earthquakes	대전대학교 산학협력단		hydrogeology journal		심사중	단독 사사	SCI
5	기타 (학술발표)	반도체 방식의 지하수내 원격 라돈 측정 장치의 현장 적용	대전대학교 산학협력단		2017 추계지질과학연합 학술발표회		2017.10.25	단독 사사	
6	기타 (학술발표)	포항 지진 이후 장기 지하수위 변동 특성	㈜지앤테크		2018 한국지하수토양환경학회 추계학술대회		2018.10.11	단독 사사	
7	기타 (학술발표)	포항지진시 지하수위 변동 및 라돈 β-입자 방출 특성	대전대학교 산학협력단		2018 추계지질과학연합학술대회		2018.10.24	단독 사사	
8	기타 (학술발표)	시추공내에서의 지층 분포에 따른 지하수 내 라돈 및 이화학적 특성	㈜지앤테크		2018 추계지질과학연합학술대회		2018.10.24	단독 사사	
9	기타 (지침)	지하수를 활용한 지진관측 시스템 구축 지침서	㈜지앤테크				2019.01		

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

건설교통부, 2002, 보조지하수관측망 설치 및 관리지침

과학기술부, 2001, 라돈방사능농도의 측정을 통한 지진발생 예측에 관한 연구

기상청, 2010, 라돈을 이용한 지진 예측 가능성 연구

기상청(www.kma.go.kr)

연세대학교 산학협력단, 2012, 지하수 모니터링을 통한 지진감시 기술개발

일본 기상청(Japan Meteorological Agency, www,jma.go.jp)

Adhikary SK, Muttil N, Yilmaz AG (2017) Improving streamflow forecast using optimal rain gauge network-based input to artificial neural network models, Hydrol Res. 49(5):1559-1577.

Blume T, Zehe E, Bronstert A (2007) Rainfall runoff response, event based runoff coefficients and hydrograph separation, Hydrol Sci J. 52(5):843-862.

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.

Chang SJ, Baag CE (2006) Crustal Structure in Southern Korea from Analysis of Regional Broadband Waveforms and Travel Times, Bull Seism Soc Am. 96:856-870, doi.org/10.1785/0120040165

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.

Chia Y, Chiu JJ, Chiang YH, Lee TP, Liu CW (2008) Spatial and temporal changes of groundwater level induced by thrust faulting, Pure Appl Geophys. 165(1):5-16

Chia Y, Wang YS, Chiu JJ, Liu CW (2001) Changes of groundwater level due to the 1999 Chi-Chi earthquake in the Choshui River alluvial fan in Taiwan, Bull Seism Soc Am. 91(5):1062-1068

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.

Chiu JM, Kim SG (2004) Estimation of Regional Seismic Hazard in the Korean Peninsula Using Historical Earthquake Data between A.D. 2 and 1995, Bull Seism Soc Am. 94(1):269-284Cho, B.W., Sung, I.H., Cho, S.H. and Park, S.K., 2007, Apreliminary investigation of radon concentrations ingroundwater of South Korea. Journal of Soil andGroundwater Environment, 12(5), 98-104 (in Korean with English abstract).

Cho, B.W., Yun, U. and Choo, C.O., 2010, Natural radon removal efficiency of small-scale water supply system. Economic and Environmental Geology, 43(1), p33-42, (in Korean with English abstract).

Cho, J.S., 2001, Investigation on the Ra-222 concentrations in groundwater, Pusan area. Master's thesis in Pusan National University, Pusan.

Choi SJ, Jeon JS, Choi JH, Kim B, Ryoo CR, Hong DG, Chwae U (2014) Estimation of possible maximum earthquake magnitudes of Quaternary faults in the southern Korean Peninsula, Quat Int. 344:53-63

Choi JH, Kim YS, Klinger Y (2017) Recent progress in studies on the characteristics of surface rupture associated with large earthquakes, J Geol Soc Korea. 53(1):129-157 (in Korean with English abstract)

Coulibaly P, Anctil F, Bobée B (2000) Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach, J Hydrol. 230(3-4):244-257

Coussot, P., 1995, Structural similarity and transition from Newtonian to non-Newtonian behavior for clay-water suspensions. Physical Review Letters, 74, 3971-3974.

Dogan E, Sengorur B, Koklu R (2009) Modeling biological oxygen demand of the Melen River in Turkey using an artificial neural network technique, J Environ Manage. 90(2):1229-1235

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.

Gihm YS, Kim SW, Ko K, Choi JH, Bae H, Hong PS, Lee Y, Lee H,Jin K, Choi SJ, Kim JC, Choi MS, Lee SR (2018) Paleoseismological implications of liquefaction-induced structures caused by the 2017 Pohang Earthquake, Geosci J. 22(6):871-880

Hong, T.K., Lee, J., Kim, W., Hahm, I.K., Woo, N.C. and Park, S., 2017, The 12 September 2016 ML 5.8 mid crustal earthquake in the Korean Peninsula and its seismic implications. Geophysical Research Letters, 44, 3131-3138.

Hung NQ, Babel MS, Weesakul S, Tripathi NK (2009) An artificial neural network model for rainfall forecasting in Bangkok, Thailand, Hydrol Earth Syst Sci. 13(8): 1413-1425

Igarashi, G, Saeki, S, Takahata, K, Sumikawa, K, Tasaka, S, Sasaki, Y, Takahashi, M, Sano, Y, 1995, Groundwater radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, Science, Vol. 269, No. 5220, 60-61.Igarashi, G, Saeki, S, Takahata, K, Sumikawa, K, Tasaka, S, Sasaki, Y, Takahashi, M, Sano, Y, 1995, Groundwater radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, Science, Vol. 269, No. 5220, 60-61.

Jeong, D.H., Eom, I.C., Yoon, J.K., Kim, M.S., Kim, Y.K. and Kim, T.S., 2010,Characteristics of groundwater environment in highly enriched areas of natural radionuclides. Journal of Soil and Groundwater Environment, 15(6), 9-16 (in Korean with English abstract).

Jónnson, S., Segall, P., Pedersen, R. and Björnsson, G., 2003, Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients. Nature, 424, 179-183.

Kano Y, 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, J Geophys Res. 111(B3):B03410

Kee WS, Kihm YH, Lee H, Cho DL, Kim BC, Song KY, Koh HJ, Lee SR, Yeon YK, Hwang S, Park KG, Seong NH (2009) Evaluation and database construction of Quaternary faults in SE Korea, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. IP2006-047-2009(1), p 327 (in Korean)

KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) (2018) Earthquakes in the South-eastern Region of Korean Peninsula. Daejeon, p 56 (in Korean)

Kim, H.G., Choi, J.S., Joo, H.J. and Kim, S.C., 2013, A study of radon removal efficiencies in drinking water according to the variations of water temperature and aeration rate in small waterwork facility. Journal of Soil and Groundwater Environment, 18(3), 52-57 (in Korean with English abstract).

Kim, J.H., Yun, S.H. and Kim, G.S., 2017, Accuracy improvement of a PIN photodiode radon counter. International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology, 4(2), 129-133.

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 Gyeong-ju earthquake. Journal of the Geological Society of Korea, 54(1), 93-105 (in Korean with English abstract).

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 Gyeong ju 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.

King CY, Chia Y (2018) Anomalous streamflow and groundwater-level changes before the 1999 M7.6 Chi-Chi earthquake in Taiwan: Possible mechanisms, Pure Appl Geophys. 175(7): 2435-2444.

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 (M9.0). 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.

Krishna B, Satyaji Rao YR, Vijaya T (2008) Modelling groundwater levels in an urban coastal aquifer using artificial neural networks, Hydrol Process. 22(8):1180-1188

Kyung JB, Jung MK, Baek JJ, Im YJ, Lee K (2010) Historic Earthquake Catalog in the Korea Peninsula. Korea Meteorological Administration, Seoul, p 475 (in Korean)

Lai WC, Hsu KC, Shieh CL, Lee YP, Chung KC, Koizumi N, Matsumoto N (2010) Evaluation of the effects of groundwater shaking and static volumetric strain change on earthquake-related groundwater level changes in Taiwan, Earth Planets Space. 62(4):391-400

Lee K, Jin YG (1991) Segmentation of the Yangsan Fault System: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang Basin, J Geol Soc Korea. 27(4): 434-449

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. Journal of Soil and Groundwater Environment, 16, 38-47 (in Koreanwith English abstract).

Lee, J.Y., 2016, Gyeongju earthquakes recorded in daily groundwater data at national groundwater monitoring stations in Gyengju. Journal of Soil and Groundwater Environment, 21, 80-86 (in Korean with English abstract).

Leggette, R.M. and Taylor, G.H., 1935, Earthquakes instrumentally recorded in artesian wells. Bulletin of Seismological Society of America, 25, 169-175.

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.

Manga M, Wang CY, Shirzaei M (2016) Increased stream discharge after the 3 September 2016 MW5.8Pawnee,Oklahoma earthquake, Geophys Res Lett. 43(22):11588-11594

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.

Ministry of Environment, 2010, Research on the management of high radon content emission route. Seoul, 166 p.

Mohr CH, Manga M, Wang CY, Kirchner JW, Bronstert A (2015) Shaking water out of soil, Geology. 43(3):207-210

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 MW8.8 Maule earthquake on 27 February 2010. Journal of Geophysical Research, 117, F02032, doi:10.1029/2011 JF002138.

Montgomery DR, Greenberg HM, Smith DT (2003) Streamflow response to the Nisqually earthquake, Earth Planet Sci Lett. 209(1 - 2):19-28

Muir-Wood R, King GCP (1993) Hydrological signatures of earthquake strain, J Geophys Res Solid Earth. 98(B12):22035-22068

Nayak PC, Satyaji Rao YR, Sudheer KP (2006) Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach, Water Resour Manage. 20(1): 77-90

Noori N, Kalin L (2016) Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction, J Hydrol. 533:141-151

Nourani V, Alami MT, Vousoughi FD (2015) Wavelet-entropy data pre-processing approach for ANN-based groundwater level modeling, J Hydrol. 524:255-269

Roeloffs EA (1998) Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to lacal and distant earthquakes, J Geophys Res Solid Earth. 103(1): 868-889

Orihara, Y., Kamogawa, M. and Nagao, T., 2014, Preseismic changes of the level and temperature of confinced groundwater related to the 2011 Tohoku earthquake.Scientific Reports, 4, doi:10.1038/srep06907.

Riggio A, Santulin M, 2015, Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, Vol. 56, No. 2, 95-114.

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.

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.

Rumelhart D, McClelland J, The PDP Research Group (1986) Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. USA, p 561

Satoki Onda, Yuji Sano, Naoto Takahata, Takanori Kagoshima, Toshihiro Miyajima, Tomo Shibata, Daniele L. Pinti, Tefang Lan, Nak Kyu Kim, Minoru Kusakabe & Yoshiro Nishio, 2017, Groundwater oxygen isotope anomaly before the M6.6 Tottori earthquake in Southwest Japan, Scientific Reports.

Shi, Z., Wang, G., Manga, M. and Wang, C.Y., 2015, Continentalscale water-level response to a large earthquake. Geofluids,15, 310-320.

Shigeki Tasaka, 2002, Development of the Groundwater Radon Detector, Japan-Taiwan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction.

Skelton, A., Andren, M., Kristmannsdottir, H., Stockmann, G., Morth, C., Sveinbjornsdottir, A., Jonsson, S., Sturkell, E., Guorunardottir, H., Hjartarson, H., Siegmund, H., and Kockum, I., 2014, Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland, Nature Geosciences, 7, 752-756.

Tsunogai, U, Wakita, H, 1995, Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan, Science, Vol. 269, No. 5220, 61-63.

Urumu Tsunogai, 2002, 地殻変動をはかる, ぶんせき, 570-574.

Valipour M (2016) Optimization of neural networks for precipitation analysis in a humid region to detect drought and wet year alarms, Meteorol Appl. 23(1):91-100

Vivek Walia, Hardev Singh Virk, Tsanyao Frank Yang, Sandeep Mahajan, 2005, Earthquake Prediction Studies Using Radon as a Precursor in N-W Himalayas, India: A Case Study, TAO, Vol.16, No.4, 775-804.

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 CY (2007) Liquefaction beyond the near field, Seismol Res Lett. 78(5): 512-517

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 (Mw ¼ 7.5) Chi-Chi earthquake (1999), Taiwan. Geofluids, 4, 210-220.

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 CY, Manga M (2010) Hydrologic responses to earthquakes and a general metric, Geofluids. 10(1-2): 206-216

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 CY, Wang CH, Kuo CH (2004) Temporal change in groundwater level following the 1999 (Mw ¼ 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.

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)

Wu W, Dandy GC, Maier HR (2014) Protocol for developing ANN models and its application to the assessment of the quality of the ANN model development process in drinking water quality modelling, Environ Model Softw. 54:108-127

Yan, R., Woith, H. and Wang, R., 2014, Groundwater level changes induced by the 2011 Tohoku earthquake in China mainland. Geophysical Journal International, 199, 533-548.

Yan, R., Woith, H., Wang, R. and Zhang, Y., 2016, Earth's free oscillations excited by the 2011 Tohoku Mw 9.0 earhtquake detected with a groundwater level array in mainland China. Geohpysical Journal International, 206(3), 1457-1466.

Yoon H, Hyun Y, Ha K, Lee KK, Kim GB (2016) A method to improve the stability and accuracy of ANN- and SVM- based time series models for long-term groundwater level predictions, Comput Geosci. 90(Part A):144-155

Zhang S, Shi Z, Wang G, Zhang Z (2018) Quantitative assessment of the mechanisms of earthquake-induced groundwater-level change in the MP well, Three Gorges area, Pure Appl Geophys. 175(7):2475-2484

Zhou X, Burbey TJ (2014) Pore-pressure response to sudden fault slip for three typical faulting regimes, Bull Seism Soc Am. 104(2):793-808

Zhou T, Wang F, Yang Z (2017) Comparative analysis of ANN and SVM models combined with wavelet preprocess for groundwater depth prediction, Water. 9(10):781

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.