J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 53, No. 7 (2020), pp. 507-519
doi: 10.3741/JKWRA.2020.53.7.507
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Basic study on development of the radon measurement system in groundwater stations for the seismic monitoring and prediction

Jang, Suk Hwan[a] · Lee, Jae-Kyoung[b]* · Lee, Sang Yoon[c] · Oh, Kyung Doo[d]

[a]Professor, Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon, Korea
[b]Assistant Professor, Innovation Center for Engineering Education, Daejin University, Pocheon, Korea
[c]Head of Department, Tricomtek, Gimpo, Korea
[d]Professor, Military Academy, Seoul, Korea

Paper number: 20-047
Received: 13 May 2020; Revised: 26 May 2020; Accepted: 26 May 2020

Abstract

This study developed the radon measurement system that can be used for crustal movement monitoring and seismic occurrence and prediction, and compared and analyzed the results of test-operated radon measurement system and observed seismic occurrence cases. First, the developed radon measurement system consists of an NB-IoT radon measurement device, data center, data analysis, and data supply server. Because the measured radon data can be remotely trasmitted by using NB-IoT, this system is very suitable for installation and operation in unmaaned groundwater station. Second, the developed radon measurement device was test-operated at two groundwater stations in Gimpo from May to July 2019. The measured radon data was compared with the groundwater-level and electrical conductivity measurement data, and it was confirmed that the radon measurement device developed in this study has some potential for commercialization. Finally, from November 2019 to February 2020, three observed seismic cases and daily measured radon, groundwater-level, electrical conductivity data by the NB-IoT radon measurement device installed at three groundwater stations in Pohang, which is a test-bed, were compared and analyzed. As a result of the analysis, it was confirmed that the seismic occurrence correlated with radon, groundwater level, and electrical conductivity and all of these measured data will be able to provide basic data to help in seismic monitoring and prediction in the future.

Keywords: Radon, NB-IoT, Seismic occurrence, Seismic prediction, Groundwater

지진모니터링과 예측을 위한 지하수관측소내 라돈 측정시스템 개발 기초연구

장석환[a] · 이재경[b]* · 이상윤[c] · 오경두[d]

[a]대진대학교 건설시스템공학과 교수, [b]대진대학교 공학교육혁신센터 조교수, [c]트라이콤텍 부장, [d]육군사관학교 교수

요 지

본 연구에서는 지각운동 모니터링과 지진발생 및 예측에 활용가능한 라돈 측정시스템을 개발하였으며, 라돈 측정시스템의 시범운영 결과와 지진발생 사례를 분석하였다. 첫 번째로, 개발된 라돈 측정시스템은 NB-IoT 라돈 측정기기, 데이터센터, 자료분석 및 자료제공 서버로 구성되며, NB-IoT를 활용하므로 측정된 자료의 원격전송이 가능하기 때문에 이 시스템은 무인 지하수관측소에 설치 및 운영에 매우 적합하다. 두 번째로 개발된 라돈 측정기기를 김포지역 지하수관측소에서 2019년 5월부터 7월까지 시범운영하였다. 측정된 라돈값을 지하수위와 전기전도도 측정자료와 비교하였으며, 본 연구에서 개발한 라돈 측정기기가 상용화하는데 어느 정도 가능성이 있음을 확인하였다. 마지막으로 2019년 11월부터 2020년 2월까지 3개 지진발생 사례와 Test-bed인 포항지역 지하수관측소에 설치된 NB-IoT 라돈 측정기기의 일단위 라돈 측정값, 일단위 지하수위, 일단위 전기전도도의 변동성을 비교·분석하였다. 분석결과, 지진발생이 라돈, 지하수위, 전기전도도와 어느 정도 상관관계가 있음을 확인하였으며, 본 측정자료가 향후 지진모니터링 및 예측에 도움이 되는 기초자료 제공이 가능함을 확인하였다

핵심용어: 라돈, NB-IoT, 지진발생, 지진예측, 지하수

***Corresponding Author.** Tel: +82-31-539-2357
E-mail: myroom1@daejin.ac.kr (J.-K. Lee)

© 2020 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

기존 사회적·경제적 피해가 큰 자연재해들은 호우·태풍·가뭄 등이 주요 원인이었고 우리나라는 지진에 의한 피해가 매우 작고 지진 안전지대라는 인식으로 인해 지진에 대한 관심이 매우 낮았다. 하지만 기상청 지진관측이래 가장 큰 규모로 2016년 9월 12일 경상북도 경주에서 리히터 규모 5.8의 지진이 발생하였으며, 2017년 11월 15일 경북 포항에서는 규모 5.4의 지진이 발생하였다. 또한 경주와 포항 지진 이후 여진만 약 400회가 넘게 관측되고 있으며, 이로 인해 우리나라에서도 규모가 큰 지진이 충분히 발생할 수 있는 가능성이 있다는 경고가 이어지고 있다. 기존과 달리 지진에 대한 영향이 사회·경제적으로 미치게 됨에 따라 지진에 대한 국민적 관심이 고조되고 있으며, 지진발생 모니터링과 관련된 다양한 연구들이 수행되고 있으나 지진관련 기초자료 및 자료검증 등이 실질적으로 미흡하고 지진발생의 원인이 매우 다양하기 때문에 정확한 추적과 이에 따른 정량적인 평가가 체계적으로 이루어지지 않는 실정이다. 특히, 지진을 모니터링하는 기술은 어느 정도 진전이 있으나 지진 발생을 예측하는 기술이나 이에 따른 피해를 사전에 저감하는 기술 등이 상대적으로 매우 미진한 상태이다. 앞서 언급한 바와 같이, 지진을 발생시키는 원인들은 매우 다양하고 어떤 하나의 원인만으로 발생하지 않기 때문에 다양한 자료와 여러 방법으로 접근해야 보다 정확한 지진발생 원인뿐만 아니라 전조증상까지 예측할 수 있다.

일반적으로 지진이 나타나는 주요원인은 주로 단층운동에 의한 지각반응으로 알려져 있으며, 이와 더불어 지진발생의 원인은 매우 다양하다. 특히 최근 지진에 대한 변동과 전조현상의 규명을 위한 연구들이 수행되고 있으며, 지진에 영향을 미치는 다양한 원인들로 지각운동을 포함하여 지하수위, 라돈, pH, 여러 수질관련 변수 등 수환경변수들의 변화가 그 대상이 되고 있다(Che and Yu, 1992; Kitagawa and Matsumoto, 1996); Chia *et al*., 2001; Chadha *et al*., 2008). Tiwari *et al*. (2004)는 지질학적으로 복잡하고 대륙판이 활동적인 인도를 대상으로 NOAA의 월간 주파수 지진시계열 자료를 비선형적 분석에 적용하여 지진메커니즘을 평가하여 인도에서 대부분의 지진은 몬순(monsoon)기간 중이나 직후에 주로 발생함을 밝혀냈다. 즉, 강우발생과 지진발생의 상관성을 밝여 강우발생을 활용한 지진발생 예측 가능성을 제시하였다.

기존 수환경변수와 지각운동 상관관계 연구들을 기반으로 본 연구에서는 수환경변수와 지각운동을 통한 지진발생 가능성 예측 중 지하수(지하수위) 변동에 초점을 맞추었으며, 그 이유는 지진발생의 주요원인은 지각운동이며, 지각운동은 수환경변수 중 지하수연동과 직접적 연관성이 있기 때문이다. 특히, 지하수로 파악이 가능한 변수들은 지하수위, 전기전도도, 탁도, 라돈농도 등이 있으며, 이들 변수의 변동성을 잘 파악한다면 지각운동, 나아가서 지진발생 가능성을 제시할 수 있다. 이와 관련된 연구들을 살펴보면, Das *et al*. (2006)은 인도 뱅갈 지역에서 지화학적(geochemical) 모니터링 시스템을 통하여 지각운동에 따른 지하수 내 라돈, 폴로늄, 비스무트 등을 모니터링하였으며, 지각운동 전과 후에 따라 방사성 결과가 달라짐을 확인하였다. Cicerone *et al*. (2009)는 수온변화, 수위변화, 전자기장변화 등 총 6개의 지진 전조현상을 사례별로 분석하여 지진발생 예측가능성을 평가하였으며, 이와 비슷한 연구들에서도 지하수와 수질관련 변수들은 지진발생을 파악할 수 있는 중요한 변수로 제시하였다(Igarashi *et al*., 1995; Wang *et al*., 2006; King *et al*., 2006; Manga and Wang, 2007; Adinolfi Falcone *et al*., 2012). KMA (2010)은 울진부근에 지하 공기와 해수에서 라돈을 측정할 수 있는 관측기기를 설치하고 지진에 따른 라돈변화를 관측하였으며, 일본 대지진 발생 이전 라돈관측결과를 분석하여 제시하였다. Chaudhuri *et al*. (2013)은 지하수 관측소가 지진 진원지와 근접할 경우, 지진발생으로 수질요소의 화학적 변화가 영향을 받으며 지진발생 며칠 혹은 몇 달 전에 큰 변동이 발생함을 밝혔다. 국내에서는 Ok *et al*. (2010)과 Lee *et al*. (2011)는 지하수 모니터링 자료를 활용하여 소·중규모의 지진감시 가능성을 분석한 바 있으며, Woo *et al*. (2015)은 지하수계의 비정상적인 변동을 관측함으로서 지진이 발생하는 심부 암반층의 비정상적인 압력변화 관측이 가능하다면, 이 결과와 다른 지진 관측시스템의 결과를 이용한 지진발생 예측의 기초기술의 활용가능성을 제시하였다. 이러한 연구결과들을 정리하면, 지각운동 혹은 지진발생(발생 가능성 증대와 재현기간 및 규모 산정, 전조 증상 등)을 파악할 수 있는 요소로서 수환경변수(지하수위, 라돈, ph, 등 수질 요소) 변동성이 매우 중요하며, 체계적인 연관성 검토가 필요한 상황이라 할 수 있다. 하지만 기존 연구들은 기존 지하수관측소 등 관측된 자료를 이용하여 분석하는 수준에 머물러 있다.

따라서 본 연구에서는 지하수내 발생하는 라돈을 측정할 수 있는 라돈 측정장비를 개발하고 적용하여 지각운동 모니터링뿐만 아니라 지진발생과 예측판단에 활용가능한 기초데이터시스템을 구축하고자 하며, 연구목적은 다음과 같다. 첫 번째로, 지각운동으로 발생하는 라돈을 정확히 측정할 수 있는 라돈 측정기기를 개발하고자 한다. 두 번째로, 개발된 라돈 측정장비의 결과를 검증하고 Test-bed에 적용하여 기존 수문순환자료(강수, 지하수위, 전기전도도)와 종합적으로 분석하여 지각운동 모니터링의 활용가능성을 파악하고자 한다. 마지막으로 지각운동 모니터링과 지진발생을 판단에 활용가능한 데이터베이스시스템을 구축하고자 한다.

2. 라돈 측정시스템 개발

2.1 라돈 측정시스템 기본구성

앞서 언급한 바와 같이, 지하에서 지진발생의 원인은 매우 다양하며 지진발생이나 지각변동이 발생하면, 지하수 등 많은 수문순환변수, 화학적인 변수, 전기적인 변수 등에 영향을 미치게 된다. 즉, 지각변동과의 연계성은 (1) 강수발생으로부터 지하로 침투·침루하여 지하수로 되어 지각에 영향을 주는 것, (2) 지각변동으로 지하수위의 변화, (3) 지각변동으로 지하수내 전기전도도 변화, (4) 지각변동으로 지각에서 지하수로 스며든 라돈농도의 변화, (5) 지각변동으로 지하수내 자연방사성물질들의 변화 등 많은 연계성을 고려할 수 있다. 이 중 본 연구에서는 기존 지하수관측소를 이용하여 상대적으로 관측이 용이한 라돈관측에 초점을 맞추었으며, 이를 위해 라돈 측정시스템을 개발하게 되었다.

라돈 측정시스템은 'IoT기반 지각운동과 수문순환을 고려한 한반도 지진 위험도 분석·예측 기술 개발' 연구단에서 주관하며, 트라이콤텍(주)에서 개발을 담당하였다. 라돈 측정시스템의 기본구성을 살펴보면, 첫 번째로 지하수에서 발생하는 라돈을 직접 측정하고 NB (Narrow Band)-IoT (Internet of Things)(현대역 사물인터넷)망을 통해 측정한 자료를 전송하는 라돈 측정기기, 두 번째로 각 라돈 측정기에서 전송한 라돈 측정값을 수신 및 관리하기 위한 데이터 센터, 마지막으로 라돈 측정자료를 분석하여 지진발생 모니터링 및 예측을 판단할 수 있도록 기초자료를 지원하는 서버로 구성된다(Fig. 1). 특히, 관측된 자료를 손실없이 전송하는 것이 매우 중요한데, 본 연구에서 개발한 라돈 측정시스템의 특징은 NB-IoT를 사용하여 측정된 자료를 원격으로 전송하므로 무인으로 운영되는 지하수관측소에 설치하여 운영하기에 매우 적합한 장점을 지니고 있다.

라돈 측정시스템에서는 라돈을 측정하는 기기와 자료를 전송하고 관리하는 데이터센터의 역할이 매우 중요하다. 라돈 측정기기는 다음 절에서 설명할 예정이며, 데이터센터의 역할에 대해서 우선적으로 살펴보고자 한다(Fig. 2). 라돈 측정기기, 데이터선테, 사용자간 발생하는 기기조정, 자료전송, 자료분석 등의 기능을 수행하기 위해서는 데이터센터의 역할이 중요하다. 우선 데이터센터의 구성도를 설명하면 다음과 같다. 라돈 측정기기에서 지하수에서 발생하는 라돈을 시간

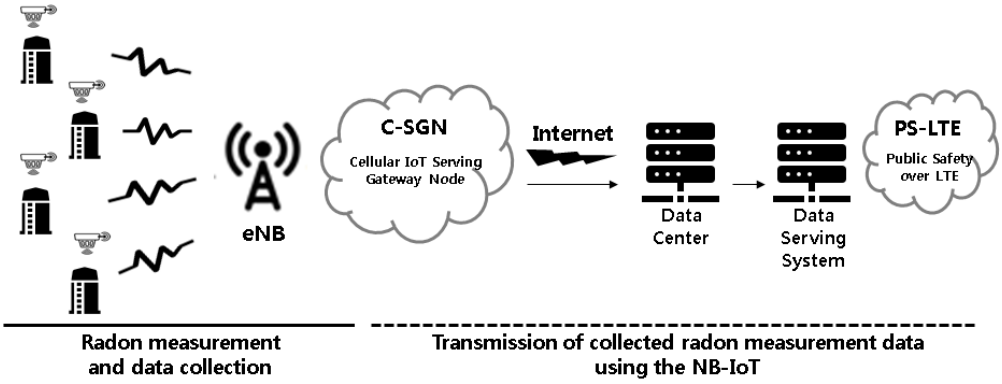


Fig. 1. The concept of radon measurement network using the NB-IoT

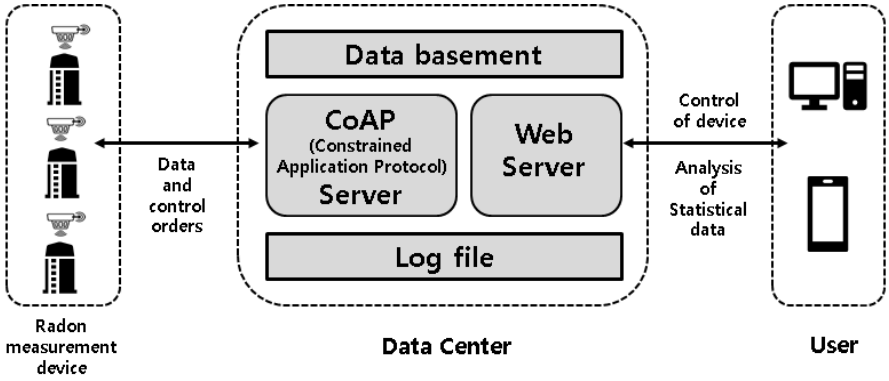


Fig. 2. The role of data center between radon measurement device, data center, and user

단위로 측정한 자료를 UDP (User Datagram Protocol)기반의 CoAP (Constrained Application Protocol)서버를 통해 데이터센터로 전송하게 된다. CoAP 서버는 라돈 측정기기와 데이터센터간 통신기능을 위한 서버이다. 여기서, 데이터 센터는 CoAP 서버, Web 서버, 에드온 프로세서로 구성되며, 데이터 저장 및 관리를 위한 데이터 베이스와 서버상태 및 통신메시지 로그(log)를 저장하기 위한 로그파일들을 포함하고 있다. 데이터센터의 CoAP 서버는 자료관련 데이터들을 수집하여 데이터베이스에 저장하고 사용자로부터 등록된 제어정보 또는 요청정보를 데이터베이스로부터 전달받아 CoAP 서버를 통해 지정된 라돈 측정기기로 제어명령을 전달하며, 라돈 측정기기는 CoAP 서버를 통해 사용자의 요청 및 제어정보 등을 수행하게 된다. Web 서버는 사용자 권한관리, 라돈 측정기기로부터 수집한 라돈 측정자료를 이요한 자료통계처리, 자료다운로드 기능을 제공하며, 자료통계처리에서는 측정시간, 설치지역, 라돈 측정기기별로 구분하여 자료를 그래프나 테이블 형태로 표현이 가능하다. 또한 사용자는 웹페이지를 통해 각 지역에 설치된 라돈 측정기기를 제어하거나 라돈 측정기기의 상태를 파악할 수 있다. 마지막으로 에드온 프로세서는 라돈 측정기기의 상태를 모니터링하거나 서버운영시스템을 제어하는 기능을 수행한다.

다음으로 데이터센터의 역할을 살펴보면, 앞서 언급한 바와 같이 측정한 라돈자료의 수집 및 관리와 자료통계처리를 지원하는 것이며, 자세한 사항은 다음과 같다. Fig. 3은 데이터센터 자료정리와 기본 웹사이트를 나타내고 있다.

2.1.1 측정된 라돈자료 수집 및 관리

- 측정기로 부터 CoAP 메시지 수신 후 데이터베이스에 측정된 라돈자료 저장
- 웹 페이지를 통한 라돈자료 확인
- 라돈자료 테이블은 월별 단위로 자료를 불러올 수 있고 라돈자료 단위형식을 베크렐(Bq/m³) 또는 피코큐리(pCi/L) 포맷으로 변경하여 값을 확인 및 엑셀 파일로 다운로드 가능하도록 함

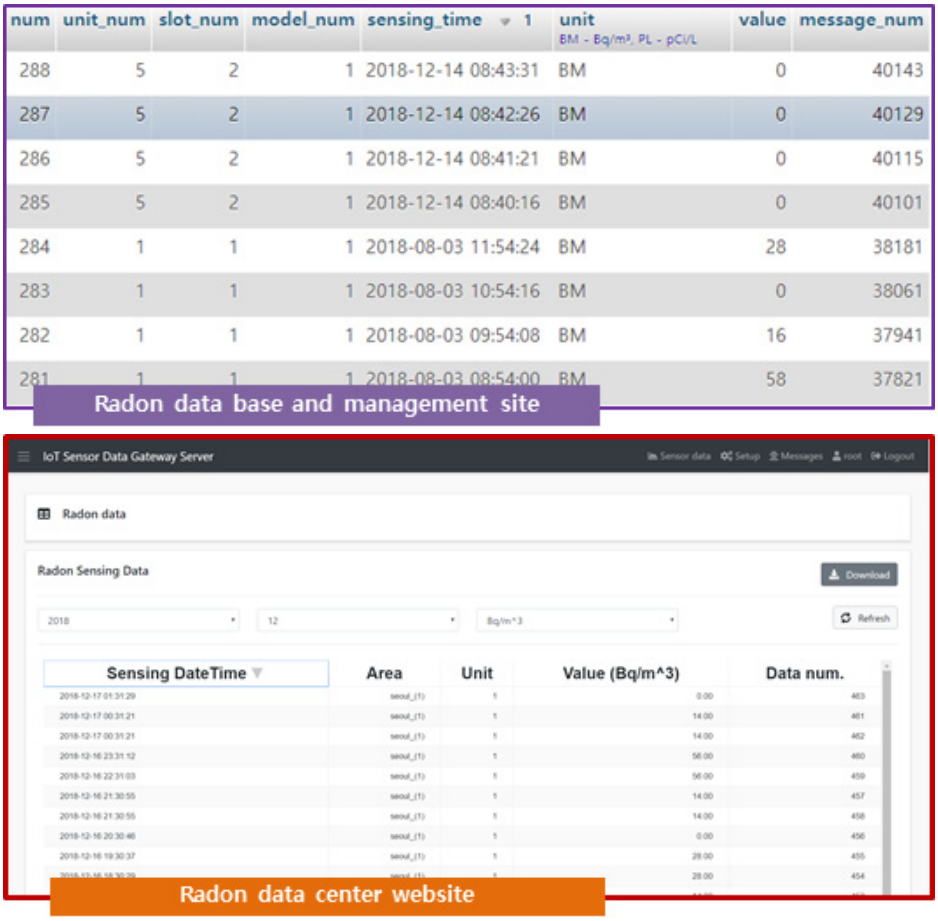


Fig. 3. Radon data management and webisite in the data center

2.1.2 자료통계처리

- 라돈자료 통계 웹페이지를 통해 라돈자료 통계 그래프 및 테이블로 확인가능도록 지원
- 라돈자료 통계 그래프는 지역별(그룹)로 등록된 라돈 측정기로부터 수신한 라돈자료를 일간, 월간, 연간단위의 시계열 그래프로 측정단위를 베크렐(Bq/m³) 또는 피코큐리(pCi/L) 단위로 변경하여 자료 제공
- 라돈자료 통계테이블도 그래프와 동일하게 일간, 월간, 연간단위로 라돈자료 통계값을 보여주며 해당 지역(그룹)안의 라돈 측정기기를 구분하여 통계자료를 각각 출력 가능함
- 라돈자료 웹페이지의 테이블과 동일하게 엑셀 파일로 다운로드 가능하도록 함

2.2 라돈 측정기기 개발

라돈을 측정하는 방법은 매우 다양한 방법들(알파비적검출법(alpha track detection method), 활성탄 캐니스터(charcoal canister), 충전막 전리함(electret ion chamter), 펄스형 이온화 챔버(pulsed ionization chamber), 섬광셀 검출(sintillation cell) 등)이 있다. 기존에 많이 적용되는 측정방법은 지하수 중이나 지하수에서 기화된 공기 중 라돈 내 베타선·감마선 등을 측정하는 방법이나 베타선·감마선이 공기 중에서 매우 빨리 사라져 측정하는데 한계점이 존재한다. 이에 본 연구에서는 지하수에서 기화된 라돈 내 입자중 공기 중에서도 상대적으로 측정하기 용이한 알파입자를 검출하는 방법을 적용하였다. 지하수내 측정은 현실적으로 지하수관측기기나 지하수관측자료에 영향을 줄 수 있어 배제하였다.

라돈 측정기기는 기본적으로 Fig. 4와 같이 라돈 측정센서 블록, 컨트롤 블록, NB-IoT 블록으로 구성되며, 라돈 측정센서 블록과 NB-IoT 블록은 컨트롤 블록과 UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) 또는 USB (Universal Serial Bus) 인터페이스로 관측자료를 전송하거나 제어명령을 보낸다. 라돈 측정센서 블럭은 라돈관측자료와 관측기기 상태를 모니터링하는 역할을 하고 NB-IoT모듈 블럭은 관측자료를 송수신하는 역할을 하며, 라돈 측정센서와 NB-IoT 블록내 장비사항은 Table 1과 같다. 추가적으로 콘트롤 블록은 자료를 체계적으로 수집하고 처리하여 신뢰성있는 자료로 정리하는 역할을 수행한다.

앞서 서술한 라돈 측정시스템을 Fig. 5와 같이 시험개발하여 직접 라돈을 측정하기 전에 임의의 라돈 측정값 자료들이 잘 전송되는지 다양한 시스템연동을 시험운영하였으며, 간

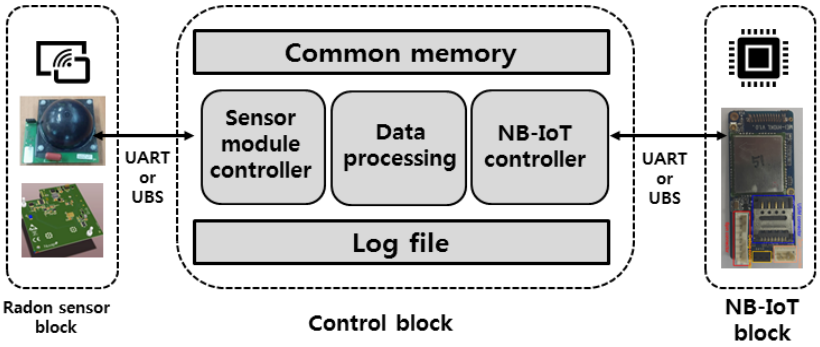
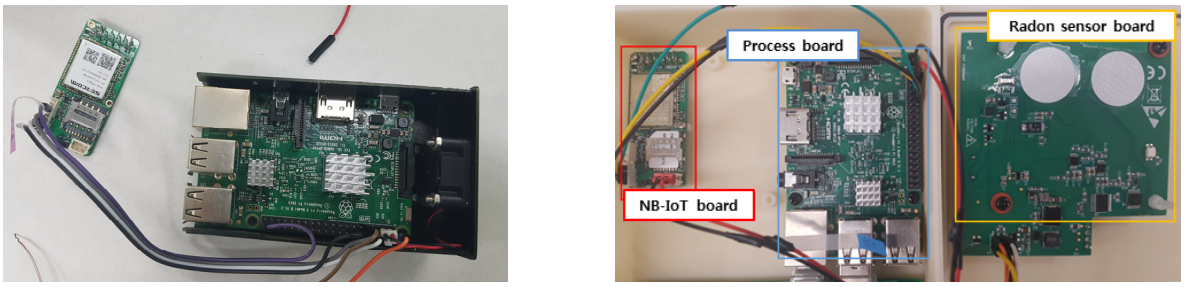


Fig. 4. The block composition of radon measurement device using the NB-IoT

Table 1. Description of radon sensor and NB-IoT network module

Radon sensor		NB-IoT module	
Item	Description	Item	Description
Model	Radon SS Sensor 1750 pCi/1	Model	Huawei NB-IoT module
Measurement	Alpha particle measurement	Technique	Rel. 13 NB-IoT
Target	Radon	Band	LTE FDD 859Mhz
Sensitivity	30 Bq/m^3	Transmission speed	UL 15.6Kbps, DL 21.2kbps
Warm-up period	60 minutes	Frequency boud	TX 824～849Mhz, RX 869～894Mhz
Error bound	6%	Interface	UART
Expiration date	5 years	-	-



(a) NB-IoT block linkage test (b) Components of radon measurement device

Fig. 5. The test for initial stage of radon measurement device

■ Main points
- Measurement bound : 0~65,000 Bq/m^3
- Warm-up period : 1 hour
- Sensitivity : 30 Bq/m^3
- Measurement error : 6%
- Data transmission period : 1 hour

■ Hardware
- MCU : ATmega328P, 16 MHz
- SRAM : 2 KB
- EEPROM : 1 KB
- NB-IoT soc : LGU+
- GPS

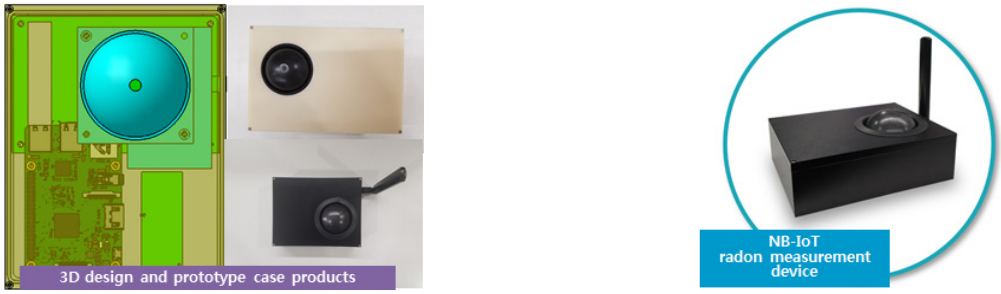


Fig. 6. The basic specification and prototype products of the radon measurement device using NB-IoT

략히 다음과 같다.

① 시험운영 1단계: 라돈 측정기기에서 UDP 서버로 임의자료 전송 및 자료 수신 확인
② 시험운영 2단계: UDP 서버에서 라돈 측정기기로 제어명령 전송 및 자료 수신 확인
③ 시험운영 결과
- 자료전송크기는 200byte이내이며, 응답이 없을 경우에 S/W, H/W reset
- 통신주기는 60분 설정 권장

3. 시범운영을 통한 라돈 측정기기 검증

3.1 라돈 측정기기 설정 및 시범운영

3.1.1 라돈 측정기기 설정

본 연구에서는 시범지점에 라돈 측정기기를 직접 설치하기 위해 프로토타입을 직접 개발하였으며, 시범운영의 목적은 시범기간 동안 라돈관측기기가 지하수에서 기화된 라돈을 잘 관측하여 데이터센터로 관측자료가 잘 전송되는지를 확인하기 위함이다. 라돈 측정기기의 주요사항과 기기성능은 Fig. 6과 같으며, 우선 라돈 측정기기의 운영을 위한 측정과 자료전송을 위한 내부설계 초기세팅과 내부부품을 설치할 측정기기 케이스 프로토타입 설계를 다음과 같이 수행하였다.

① 최초 유효 데이터는 워밍업 1시간 이후 측정, 데이터는 1시간 단위로 평균값 출력
② 단기 분석은 3시간 측정 평균값 사용, 장기 분석은 12시간 측정 평균값 사용
③ 10분 이내에 라돈농도 측정값 요구 시, 무응답 상황 고려하여 1시간 주기로 측정
④ 직사각형 모양 케이스 안에 프로세서 보드, NB-IoT 통신 보드, 전원컨버터 보드, 라돈 센서 보드를 지지 할 수 있는 서포트가 포함되어 설계
⑤ 수신감도 향상을 위한 외장형 안테나 포함된 알루미늄 제질 케이스 적용

(a) Gimpo Wolgot (b) Gimpo Haseong

Fig. 7. The location of groundwater stations for the field-test

Table 2. Description of groundwater stations for the field-test

Item	Groundwater station	
	Gimop Wolgot	Gimop Haseong
Operation period	2013.12.31.~	2012.12.31.~
Tube depth (m)	100 m (1)	100 m (1)
Tube diameter (cm)	External: 15 cm, Internal: 13 cm	External: 15 cm, Internal: 13 cm
Terrane tyep	Bedrodk (aquifer)	Bedrodk (aquifer)
Station tyep	Outside in the guard net	Outside in the guard net
Electric power supply	Solar panels (60 W)	Solar panels (25 W)
Data communication	WDAMA (3G) M2M	WDAMA (3G) M2M

3.1.2 시범지점 운영 및 결과

본 연구에서는 시범지점 선정을 위해 전국 지하수관측소를 관리·운영하고 있는 환경부 한국수자원공사 물종합정보처의 협조를 받아 김포 하성 지하수관측소와 김포 월곶 지하수관측소를 시범지점으로 선정하고, 본 연구에서 개발한 라돈 측정기기를 설치하고 시범운영을 수행하였다. 측정방법은 크게 '관정 내 측정방법', '관정 위 측정방법', '관정 옆 측정방법'이 있다. 관정내 측정방법은 지하수에서 기화되는 라돈을 직접적으로 측정가능한 장점이 있으나 지하수와 라돈 측정센서간 이격거리를 일정하게 유지해야 하는 점, 방수모듈제작으로 비용 증가, 기존 수위센서와의 충돌가능성, 관정내경 확보 등의 단점이 존재한다. 관정 위 측정방법은 라돈 측정수치는 관정 내 측정보다는 신뢰도가 조금 낮으나 변화량 측정이 용이하고 수위센서와 충돌가능성이 없으나 지하수 수위가 라돈 농도에 조금 영향을 미칠 수 있다. 마지막으로 관정 옆 측정방법은 관정 위 측정방법과 장점은 비슷하나 간접측정이므로 앞선 두 방법보다 측정자료의 신뢰도가 가장 낮다. 따라서 본 연구에서는 기 개발된 라돈 측정기기의 활용도가 가장 적합한 관정 위 측정방법을 선택하였다. 이 두 관측소를 선정한 이유는 시범운영 당시 접근성, 측정방법, 전력공급편리성, 관측기기 설치 및 회수용이성 등을 고려하여 최종 결정하였다. Fig. 7은 김포 하성과 월곶 지하수관측소의 설치위치·주변환경 및 지하수관측기기가 설치된 현황을 보여주며, Table 2는 각 관측소의 기본정보를 나타내고 있다.

다음으로 시범운영 결과를 살펴보면, 시범운영기간은 2019년 5월부터 7월까지 약 3개월간 운영하였으며, 김포 월곶과 김포 하성 지하수관측소에 설치된 라돈 관측기기에서 라돈 관측자료가 잘 전송되는 것을 확인하였다. Fig. 8은 김포 월곶과 김포 하성 지하수관측소에서 측정한 지하수위(groundwater-level), 전기전도도(EC, Electrical Conductivity), 라돈(radon) 일단위 측정값이며, 지하수위와 전기전도도 측정값은 국가지하수정보센터(www.gims.go.kr)에서 취득하였으며, 라돈 측정값은 설치한 관측기기에서 취득한 값이다. 시범운영 기간동안 김포 월곶은 지하수위가 약간 낮아지는 경향을 나타냈으며, 김포 하성은 다소 증가하는 경향을 나타냈으나 시범운영 지점 근방에서 특별한 지진이나 지각운동이 발생하지 않았기 때문에 전기전도도나 라돈값은 이에 따른 특정한 경향을 나타내지 않았다. 특히, 라돈 측정기기에서 데이터센터에 라돈 측정값을 잘 전송하고 자료의 질 또한 매우 양호한 것으로 판단하여 본 연구에서 개발한 라돈 측정기기가 상용화하는데 어느 정도 가능성이 있음을 확인하였다.

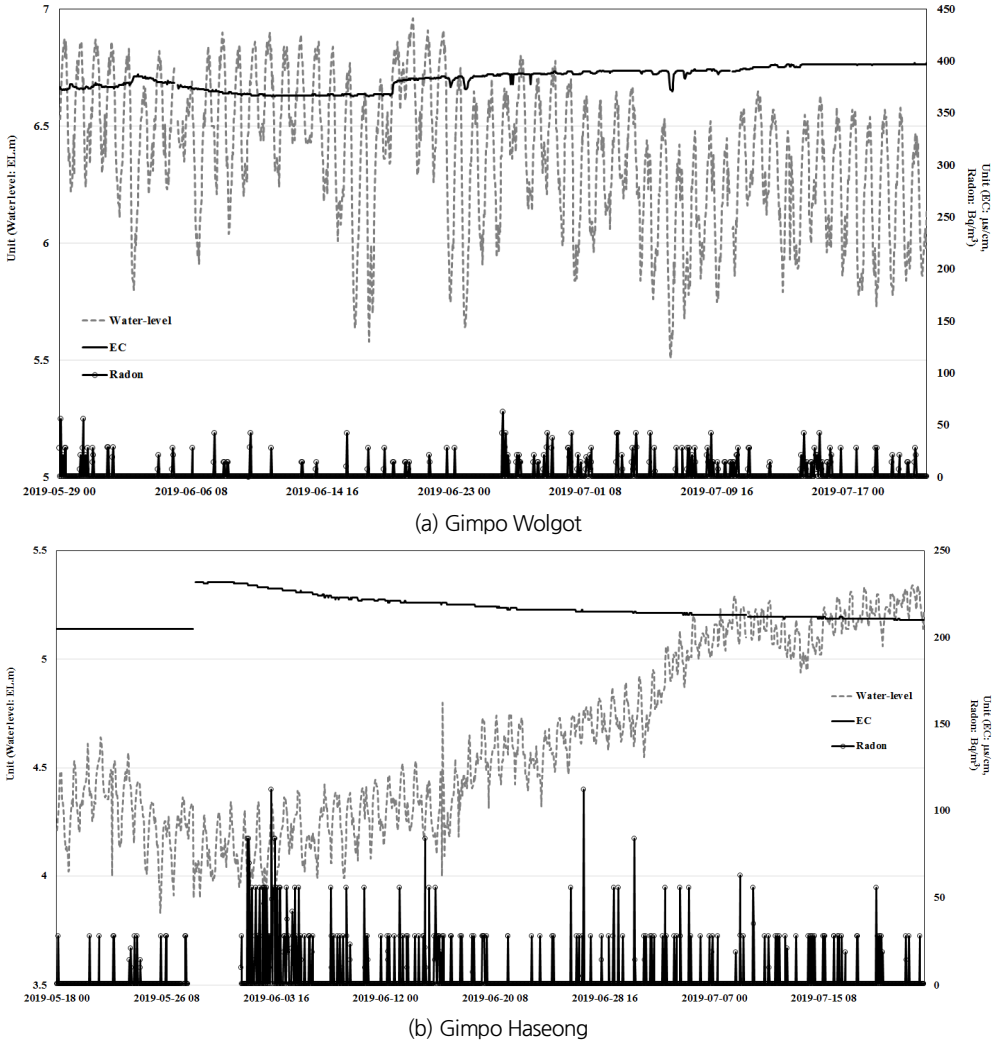


Fig. 8. Time-series of groundwater-level, electrical conductivity, radon in the field-test

3.2 상용화를 위한 Test-bed 적용 및 결과분석

본 연구에서는 상용화를 위해 시범운영에 활용한 라돈 측정기기보다 조금 더 개선하였으며, 최근 한반도에서 지진이 자주 발생하는 포항 지역을 Test-bed로 선정하여 추가 검증을 수행하였고 자세한 내용은 다음 절에 서술하였다.

3.2.1 상용화를 위한 라돈 계측장비 개선 및 Test-bed 선정

본 연구에서는 시범운영결과를 분석하여 라돈 측정기기의 운영에 있어서 측정방법, 측정기기의 하드웨어 구성, 케이스, 메인보드의 한계점들을 보완하기 위해 프로세서 보드, 케이스 등을 새롭게 보완하였으며, 이에 따른 새로운 라돈 측정기기(이하 NB-IoT 라돈 측정기기)를 개발하였으며, 자세한 주요 사양과 기능은 Fig. 9와 같다. 특히 NB-IoT 라돈 측정기기 개선과 더불어 데이터센터의 기능도 개선하였다. 첫 번째는 SMS 알람기능 추가하여 라돈 농도가 기준치 초과시 SMS을 발송하며, 기준을 초과한 측정기기들의 값 우선순위에 따라 라돈 측정값을 표시할 수 있도록 하였다. 두 번째는 데이터센터 실시간 모니터링 지도를 구축하여 웹사이트에서 모니터링이 가능하도록 하였다. 이에 따라 위치 기반 자료통계값의 제공이 가능하며, 17개 시·도 지역별 측정값을 지도에 표시가 가능하며, 라돈 측정농도에 따라 색을 달리하여 표시가 가능하다.

Test-bed 선정은 기존 지진발생의 빈도가 많았던 포항을 중심으로 우선 선정하였으며, 시범운용때와 동일하게 환경부 한국수자원공사 물종합정보처의 협조를 받아 포항 신광(2019년 11월부터 현재)·포항 장흥(2019년 11월부터 현재)·포항 동해(2019년 12월부터 현재) 지하수관측소에 NB-IoT 라돈 측정기기를 설치하였다.

■ Main points
- Measurement bound : 0~65,000 Bq/m^3
- Warm-up period : 1 hour
- Sensitivity : 30 Bq/m^3
- Measurement error : 6%
- Data transmission period : 1 hour

■ Hardware
- MCU : ATmega328P, 16 MHz
- SRAM : 2 KB
- EEPROM : 1 KB
- NB-IoT soc : LGU+
- GPS error: within 10 m

■ Main functions
- Measuring radon in the air
- NB-IoT wireless communication
  - based on LTE, wide coverage
- Collecting locations of devices
  - statistical analysis for each device or region

Fig. 9. The basic specification of 2nd version radon measurement device using NB-IoT

Table 3. Description of groundwater stations for the field-test

Item	E1	E2	E3	E4
Date	2019.11.29. 12:04	2019.12.30. 00:.35	2020.01.08. 06:03	2020.01.30. 00:52
Magnitude	2.0 (±0.2)	3.5 (±0.2)	2.0 (±0.2)	3.2 (±0.2)
Maximum grade	Grade I	Grade IV	Grade I	Grade III
Location	East Sea 38 km (36.86N, 129.79E)	Milyang-si (35.56N, 128.90E)	Sungju-gun (35.91N, 128.38E)	Sangju-si (36.59N, 128.12E)
Occurrence depth	21 km	20 km	17 km	21 km
Note	No damage	-	No damage	vibratory ground motion

3.2.2 Test-bed 운영결과 분석

본 연구에서는 2019년 11월부터 2020년 2월까지 기상청에 기록된 지진이 발생한 시점을 중심으로 Test-bed에 설치된 NB-IoT 라돈 측정기기의 일단위 라돈 측정값, 지하수관측소에서 관측된 일단위 지하수위, 일단위 전기전도도의 변동성을 비교·분석하였다. 이를 통해 앞서 설명한 측정된 자료들을 활용하여 지진발생·지각운동을 모니터링하거나 추후 지진발생을 예측할 수 있는 기초자료로 활용가능한지 등을 살펴보았다. Table 3은 본 연구에 활용한 기상청(www.kma.go.kr) 지진관측소에서 선택한 지진발생 기본정보를 나타내고 있으며, Fig. 10은 지진이 발생한 위치와 NB-IoT 라돈 측정기기의 위치를 나타내고 있다.

Fig. 11은 포항 신광, 포항 동해, 포항 장흥 지하수관측소에서 측정된 라돈, 지하수위, 전기전도도의 시계열 자료와 Table 3에서 설명한 경북지방에서 발생한 지진과의 상관관계 분석내용도 나타내고 있다. 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 기초연구이며 향후 지진발생 모니터링과 예측에 대한 기초자료

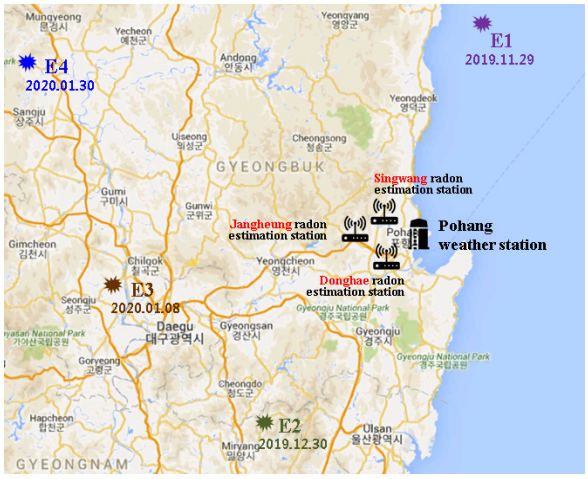
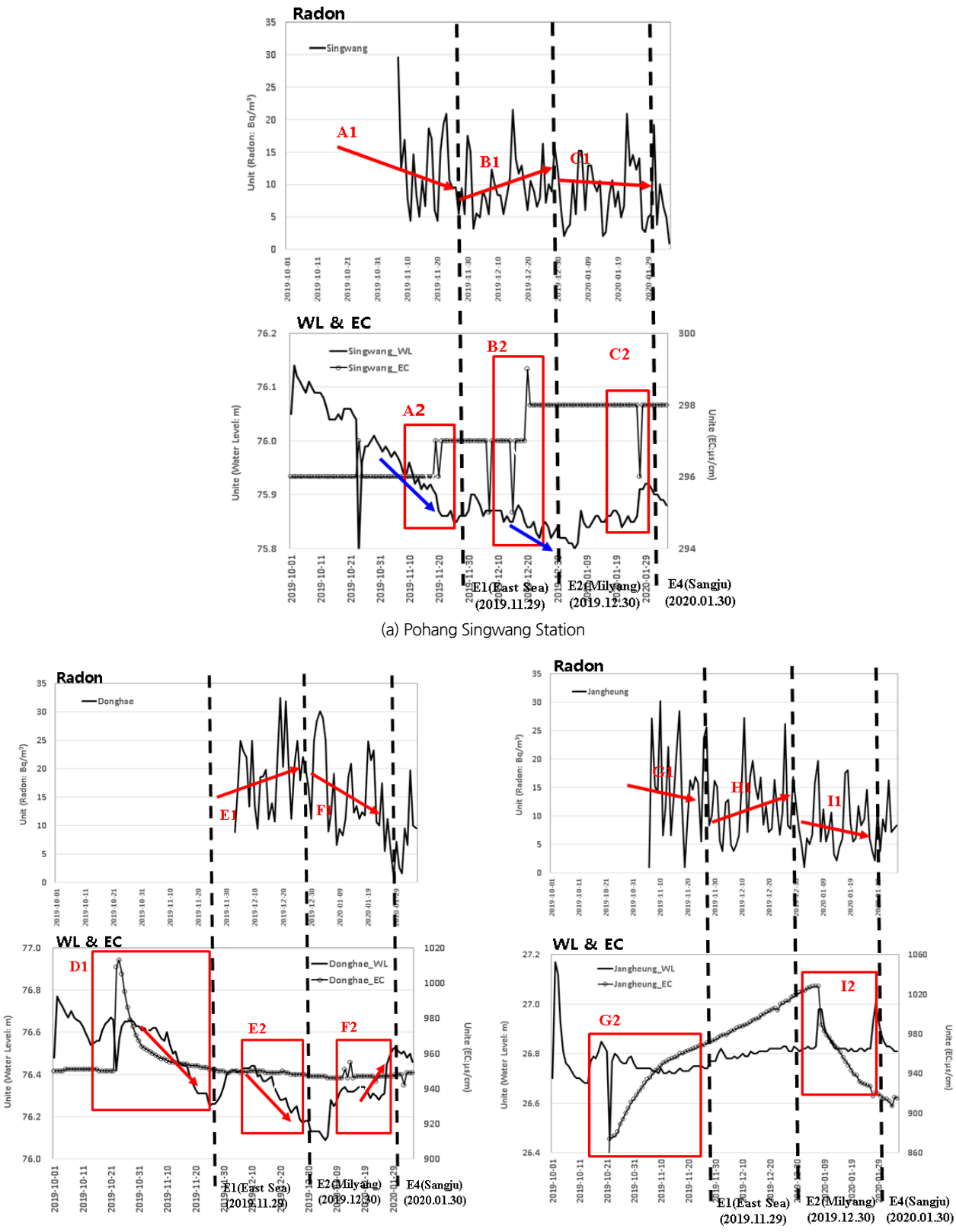


Fig. 10. The map of locations of radon estimation stations and earthquake occurrences

를 제공함에 목적이 있으므로, 측정된 자료와 기 발생한 지진과의 상관관계를 우선 분석함에 있음을 밝힌다. 또한 E3의 경



(a) Pohang Singwang Station

(b) Pohang Donghae Station

(C) Pohang Jangheung Station

Fig. 11. Analysis of time series of estimated radon, water-level, and electrical conductivity in three groundwater stations at the test-bed

우, 지진강도와 단계가 낮고 내륙의 강도가 상대적으로 큰 E2와 E4 사례가 있어 비교에서는 제외하였다.

포항 신광 지하수관측소에서 측정된 자료들의 시계열들을 살펴보면, Fig. 11(a)에 나타나있다. 라돈 측정시계열을 살펴보면, 지진이 발생한 시점인 E1, E2, E4 사이에 A1, B1, C1과 같이 측정값들의 경향성이 지진발생시점을 기준으로 변하고 있는 것으로 나타났다. 또한 지하수위(WL)와 전기전도도(EC) 시계열을 살펴보면, 지진발생시점 전에 A2, B2, C2와 같이 전기전도도가 다소 크게 변동이 발생하고 있는 것을 알 수 있으며, 지하수위의 경우에는 A2와 B2에서 지진발생시점 전에 지하수위가 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이 시기에는 기상청 포항 기상관측소 기준으로 강우량이 크지 않고 강우발생기간도 짧아(11월 28일: 16.8 mm, 12월 29～30일: 6.0 mm), 지진발생 이외에 기타 외부요인은 없는 것으로 분석되었다.

다음으로 포항 동해 지하수관측소에서 측정돈 자료들의 시계열을 살펴보면, Fig. 11(b)과 같다. 라돈 측정시계열을 살펴보면, E2 발생을 중심으로 라돈 측정시계열의 경향성이 증가했다가 감소하여 포항 신광의 라돈 측정자료와 동일한 경향을 나타냈다. 지하수위를 살펴보면, E1, E2, E4 발생 이전에 지하수위가 급격히 감소하거나 증가하는 경향(D1, E2, F2)을 보였으며, 전기전도도에서는 D1과 F2에서 지진발생 전에 측정값의 급격한 변동이 발생하였다. 포항 동해 지하수관측소도 이 시기에 특별히 영향을 줄 기타 외부요인은 존재하지 않았다.

마지막으로 포항 장흥 지하수관측소 측정된 자료들의 시계열은 Fig. 11(c)과 같다. 라돈 측정계열을 살펴보면, E1, E2, E4 발생 전과 후에 G1, H1, I1에서 시계열 경향성의 변동성이 포항 신광 및 동해와 어느 정도 일치하는 경향성을 나타냈다. 지하수위의 경우, E1과 E4 발생 전에 급격한 변동을 나타냈으며, 전기전도도는 E1 발생 전에는 전기전도도가 다소 급격히 증가하는 경향을 나타냈으나 E4 발생 전에 측정값이 급격히 감소하였다.

추가적으로 지진발생에 따른 지하수위와 전기전도도를 비교하면 다음과 같다. Fig. 12에서 2019년 4월 22일 05:45경에 경북 울진군 동남동쪽 38 km 지점에서 진도 4.0으로 발생한 지진(E5)을 나타내며, 이 지진은 경북 지역에는 진도 등급 III, 강원도 지역에는 진도등급 II로 측정되었다. E5가 발생시점 이전에 EC의 큰 변동이 발생하였으며, 지하수위도 하강과 상승의 변동이 발생하였다. 이는 앞서 설명한 지진발생과 EC와 지하수위와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 하지만 이전 포항 동해 지하수관측소 근방에서 지진발생이 기록되지 않은 기간동안에는 EC와 지하수위의 변동이 거의 없는 것으로 나타났다.

전체적으로 본 연구에서 지진발생지점과 각 관측소의 거리, 지진발생시점(E1, E2, E4)를 중심으로 라돈, 지하수위, 전기전도도의 변동성 및 경향성을 살펴보았으며, 라돈 측정값의 경우에는 모든 관측소에서 유사한 경향성을 나타냈고 지하수위·전기전도도에서는 관측소별 조금 차이가 있으나 지진발생 전 다소 변동성이 크게 나타나는 특이한 현상이 분석되었다. 추가적인 연구들이 더 필요할 것이나 앞선 분석결과들

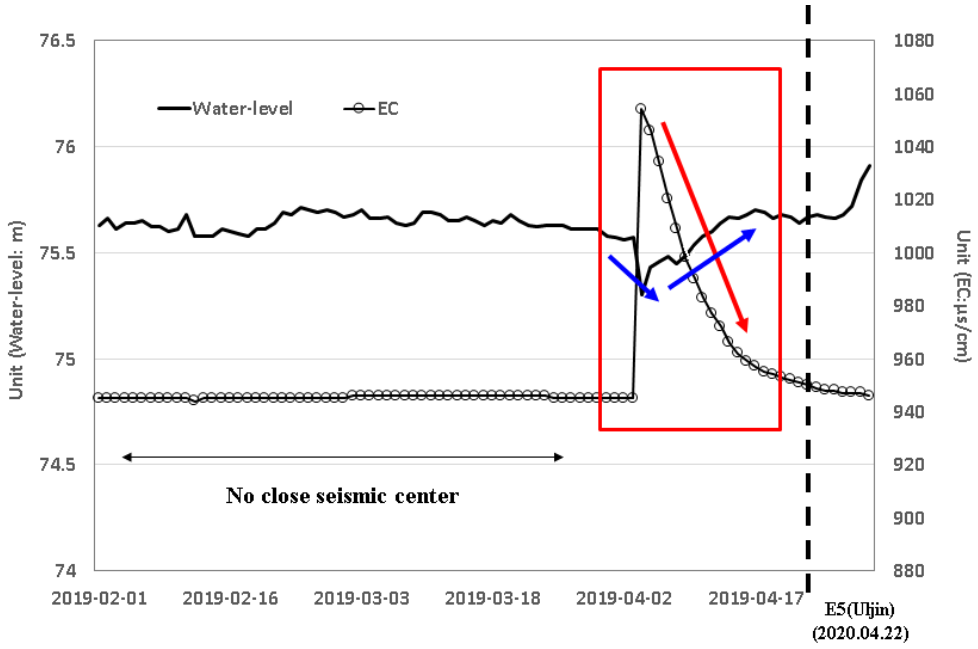


Fig. 12. Comparison of water-level and EC w/o close seismic centers in Pohang Donghae station

을 바탕으로 지진발생이 라돈, 지하수위, 전기전도도와 어느 정도 상관관계가 있음을 확인하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지각운동 모니터링뿐만 아니라 향후 지진발생과 예측판단에 활용가능한 기초데이터시스템을 구축하고자 라돈 측정시스템을 개발하였다. 또한 라돈 측정시스템을 시범운영하고 지진발생 사례와 비교 및 분석하였다. 이에 대한 본 연구에서 수행한 연구내용을 자세히 살펴보면, 첫 번째로 NB-IoT 라돈 측정기기, 데이터센터, 자료분석 및 자료제공 서버로 구성되어 있는 라돈 측정시스템을 개발하였으며, 이 측정시스템의 특징은 NB-IoT를 기반으로 측정된 자료의 원격 전송이 가능하므로 무인 지하수관측소에 설치 및 운영에 매우 적합하다는 것이다. 또한 라돈 측정기기는 지하수관측관정에서 적합한 알파입자를 검출하는 방법을 적용하였으며, 초기모형, 시범운영을 위한 모형, NB-IoT기반 모형까지 점진적으로 개선된 측정기기까지 개발하였다.

두 번째로 한국수자원공사의 협조 하에 김포 월곶과 김포 하성 지하수관측소에 설치하여 2019년 5월부터 7월까지 운영하여 적용가능성을 검토하였으며, 측정방법은 지하수관측소의 관정 내 기존 센서모듈에 피해가 없도록 관정 위 측정방법을 적용하였다. 동일기간 국가지하수정보센터의 지하수위와 전기전도도 측정자료와 라돈 측정기기를 이용한 라돈 측정자료와 비교하였으며, 라돈 측정기기에서 데이터센터에 라돈 측정값을 잘 전송하고 자료의 질 또한 매우 양호한 것으로 판단하여 본 연구에서 개발한 라돈 측정기기가 상용화하는데 어느 정도 가능성이 있음을 확인하였다.

마지막으로 본 연구에서는 2019년 11월부터 2020년 2월까지 기상청에 기록된 3개의 지진발생 사례를 선정하고 Test-bed인 포항 신광, 포항 동해, 포항 장흥 지하수관측소에 설치된 NB-IoT 라돈 측정기기의 일단위 라돈 측정값, 지하수관측소에서 관측된 일단위 지하수위, 일단위 전기전도도의 변동성을 비교·분석하였다. 결과를 살펴보면, 라돈 측정값의 경우 모든 관측소에서 동일한 경향성을 보였으며, 지하수위·전기전도도에서는 관측소별 차이가 있으나 지진발생 전 어떤 시점에 특이하게 변동성이 크게 관측되었다. 이 결과를 바탕으로 지진발생이 라돈, 지하수위, 전기전도도와 어느 정도 상관관계가 있음을 확인하였다.

이 연구의 한계점은 다음과 같다. 우선 지각운동에 대한 분석이 다소 미비했다. 지진발생에서는 지각의 움직이는 방향(좌·우·상·하), 어떤 단층끼리 이동하고 영향을 주었는지 등 이러한 지각운동이 라돈 발생정도, 지하수위 변동, 전기전도도에 영향을 줄 것이므로 지각운동에 대한 분석이 더 수행된다면 지진발생과 측정된 자료들의간의 보다 정확한 상관관계 분석이 가능할 것이다. 다음으로 라돈 관측자료 길이의 한계이다. 기존 연구들에서 지하수위 등과 지각운동의 상관성은 일반적으로 몇 개월의 자료를 이용하게 되나 본 연구에서는 추후 더 많은 자료를 확보하여 분석이 이루어져야 한다.

하지만 본 연구는 지각운동과 연관성이 높은 라돈을 측정할 수 있는 기기를 개발하고 지하수 관측소를 이용하여 편리하게 측정값을 취득할 수 있는 방법을 고안하였다. 또한 Test-bed 적용을 통해 측정자료와 지진발생의 상관관계를 어느 정도 분석하여, 본 측정자료가 향후 지진모니터링 및 예측에 도움이 되는 기초자료 제공이 가능함을 확인하였다는데 큰 의의가 있다고 하겠다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단(NFR-2017R1E1A1A01075118)의 지원을 받았습니다.

References

Adinolfi Falcone, R., Carucci V., Falgiani, A., Manetta, M., Parisse, B., Petitta, M., Rusi, S., Spizzico, M., and Tallini, M. (2012). “Changes on groundwater flow and hydrochemistry of the Gran Sasso carbonate aquifer after 2009 L’Aquila earthquake.” *Italian Journal of Geosciences*, Vol. 131, No. 3, pp. 459-474.

Chadha, R.K., Kuempel, H.J., and Shekar, M. (2008). “Reservoir triggered seisimicity and well water level response in the Koyna-warna region, India.” *Tectonophysics*, Vol. 456, No. 1-2, pp. 94-102.

Chaudhuri, H., Barman, C., Sekar Iyengar, A.N., Ghose, D., Sen P., and Sinha, B. (2013). “Network of seismo-geochemical monitoring observatories for earthquake prediction research in India.” *Acta Geophysica*, Vol. 61, No. 4, pp. 1000-1025.

Che, Y., and Yu, J. (1992). “The statistical characteristics of groundwater level anomaly before some moderatestrong earthquakes in the Eastern China continent.” *Seismological Geology*, Vol. 14, No. 1, pp. 23-29. (in Chinese with English abstract).

Chia, Y., Wang, Y.S., Chiu, J.J., and Liu, C.W. (2001). “Changes of groundwater level due to the 1999 chi-chi earthquake in the Choshui river alluvial fan in Taiwan.” *Bulletin of the Sesimological Society of America*, Vol. 91, No. 5, pp. 1062-

1068.

Cicerone, R.D., Ebel, J.E., and Britton, J. (2009). "A systematic compilation of earthquake precursors." *Tectonophysics*, Vol. 476, No. 3-4, pp. 371-396.

Das, N.K., Chouldhury, H., Bhandari, R.K., Chose, D., Sen, P., and Sinha, B. (2006). "Continuous monitoring of ^{222}Rn and its progeny at a remote station for seismic hazard surveillance." *Radiation Measurements*, Vol. 41, No. 5, pp. 634-637.

Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N.M., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., and Sano, Y. (1995). "Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan." *Science*, Vol. 269, pp. 60-61.

King, C.-Y., Zhang, W., and Zhang, Z. (2006). "Earthquake induced groundwater and gas changes." *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 163, pp. 633-645.

Kitagawa, G., and Matsumoto, N. (1996). "Detection of coseismic changes of underground water level." *Journal of American Statistical Assocication*, Vol. 91, pp. 521-528.

Korea Meteorological Administration (KMA) (2010). *Monitoring radon as a portent of earthquakes*. CATER 2010-5304, Korea Meteorological Administration.

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*, Vol. 16, No. 3, pp. 38-47.

Manga, M., and Wang, C.-Y. (2007). *Earthquake Hydrology*. Chapter 4.10, Elsevier, pp. 293-320.

Ok, S.-I., Hamm, S.-Y., Kim, B.-S., Cheong, J.-Y., Woo, N.-C., Lee, S.-H., Koh, G.-W., and Park, Y.-S. (2010). "Characteristics of aquifer system and change of groundwater level due to earthquake in the western half of Jeju Island." *Economic and Environmental Geology*, Vol. 43, No. 4, pp. 359-369.

Tiwari, R.K., Lakshmi, S.S., and Rao, K.N.N. (2004). "Characterization of earthquake dynamics in Northeastern India regions: A modern nonlinear forecasting approach." *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 161, pp. 865-880.

Wang, K., Chen, Q.-F., Sun, S., and Wang, A. (2006). "Predicting the 1975 Haicheng earthquake." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, pp. 757-795.

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." *Journal of Engineering Geology*, Vol. 25, No. 1, pp. 21-33.