

TECHNICAL NOTES

MEMS 센서 기반 지반진동 정보 크라우드소싱 수집시스템 개발 현황

이상호, 권지희, 류동우*

한국지질자원연구원 지오플랫폼연구본부

Development Status of Crowdsourced Ground Vibration Data Collection System Based on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) Sensor

Sangho Lee, Jihoe Kwon, and Dong-Woo Ryu*

Geoscience Platform Division, Korea Institute of Geoscience and Mining Resources

*Corresponding author: dwryu@kigam.re.kr

Received: December 4, 2018
Revised: December 18, 2018
Accepted: December 18, 2018

ABSTRACT

Using crowdsourced sensor data collection technique, it is possible to collect high-density ground vibration data which is difficult to obtain by conventional methods. In this study, we have developed a crowdsourced ground vibration data collection system using MEMS sensors mounted on small electronic devices including smartphones, and implemented client and server based on the proposed infrastructure system design. The system is designed to gather vibration data quickly through Android-based smartphones or fixed devices based on Android Things, minimizing the usage of resource like power usage and data transmission traffic of the hardware.

Keywords: Ground vibration, MEMS, Accelerometer, Crowdsourcing, Smartphone

초록

크라우드소싱을 활용한 센서 자료 수집은 기존의 방식으로 얻기 어려운 고밀도 지반 진동 정보의 수집이 가능하다. 본 연구에서는 스마트폰과 같은 소형 전자기기에 탑재된 MEMS 센서를 활용한 크라우드소싱 방식 지반 진동 수집 시스템을 개발하였으며, 이를 위한 기반 체계 설계 및 클라이언트와 서버에 대한 구현을 수행하였다. 해당 시스템은 Android 기반의 스마트폰이나 Android Things 기반의 고정식 장비를 통해 진동 데이터를 신속히 수집하면서 하드웨어의 전력 및 데이터 사용량을 최소화할 수 있도록 설계되었다.

핵심어: 지반 진동, MEMS, 가속도계, 크라우드소싱, 스마트폰

1. 서론

스마트폰을 필두로 한 소형 통신장비의 보급과 이를 뒷받침하는 통신망의 발달에 따라 다양한 지반정보 수집 기술 및 기법들이 등장하고 있다(Qiuping et al., 2011). 특히 크라우드소싱(crowdsourcing) 방식의 자료 수집 기법은 참여자가 자발적으로 소프트웨어를 설치하여 이에 따른 보상을 얻도록 하는 방법으로서, 참여자가 동의하는 한 지속적으로 센서로부터 값을 취득 가능하므로



기존의 방법으로 얻기 어려운 자료를 취득할 수 있다(Cartwright, 2016).

휴대용 스마트 기기 내의 가속도계를 이용한 지반 진동 자료의 취득은 이러한 방식이 가장 효율적으로 활용될 수 있는 분야로서, 소형 전자기기에 탑재되는 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 센서는 측정용 장비에 비하여 출력되는 자료의 품질이 낮은 편이나 대부분의 스마트폰에 탑재되어 있으므로 활용 여부에 따라 낮은 비용으로 대규모의 센서 네트워크 구성이 가능하다(Zambrano et al., 2017). 고밀도로 측정된 지반 진동 자료는 조기 경보, 국지적 지반 해석이나 구조물의 피해 산정 등의 다양한 분야에서 활용이 가능하나(D'Alessandro et al., 2014, Feng et al., 2015) 국내에서는 아직 이러한 시도가 이루어지지 못하였다.

본 연구에서는 이러한 장점들을 활용하여 스마트폰 및 고정식 장비 기반의 클라우드소싱 지반 진동 자료 수집 시스템을 개발하고자 하였다. 이를 위해 전체 시스템 구조에 대한 설계 및 하드웨어 자원 사용과 자료 수집의 효율화를 위한 수집 체계를 개발하였으며, 시스템을 구성하는 서버와 클라이언트에 대한 시범 구현을 수행하였다.

2. 선행 연구 사례

저가형 MEMS 센서를 이용한 지반 또는 구조물 진동 자료 수집 사례는 다수 존재하나(Hsieh et al., 2014, Kim et al., 2017, Shrestha et al., 2018, Pierleoni et al., 2018) 스마트폰 등의 개인용 장비에 탑재된 센서를 이용한 클라우드소싱 방식의 지반 진동 자료 수집 체계로서는 MyShake(Kong et al., 2016a) 및 Earthquake Network(Finazzi, 2016)만이 출시 및 상용화되어 있다. 양 사례 모두 스마트폰으로부터 수집된 자료들을 기반으로 한 지진 조기 경보(EEW, Earthquake Early Warning)를 목적으로 하고 있으며, 사용자들로부터 수집된 정보를 이용하여 조기 경보를 수행함으로써 참여에 대한 보상을 제공하는 방식을 갖는다. MyShake의 경우 아직 조기 경보는 이루어지지 않고 있으나 실제 배포를 통한 자료 수집을 통해 6개월간 200건 이상의 지진을 감지하여 클라우드소싱 기반 지반진동 수집 체계의 효용성을 입증한 바 있으며(Kong et al., 2016b), Earthquake Network의 사례도 마찬가지로 100,000명 이상의 사용자로부터 제공된 자료를 기반으로 200건 이상의 지진을 감지하였다고 보고하였다(Finazzi, 2016). 그러나 MyShake의 경우 진동 자료를 수집하여 내부적으로 ANN(Artificial Neural Network)을 이용한 생활 진동 필터링 등의 처리를 거친 뒤 서버로 전송하는 반면, Earthquake Network은 진동이 일어난 사실만을 전송하여 지구통계 기반의 조기 경보를 수행하는 등(Finazzi and Fasso, 2017) 세부적인 방식은 다소 차이를 보인다(Table 1).

이러한 사례 이외에도 Quake Catcher Network(Cochran et al., 2009), Community Seismic Network(Clayton et al., 2011) 등의 자발적 참여형 지진 네트워크 프로젝트들이 존재하나 이들은 센서가 탑재된 하드웨어를 참여자가 직접 주문하여 설치하는 방식으로, 소프트웨어 설치만으로 즉시 구동이 가능한 상기 사례들에 비하여 설치, 구동 및 하드웨어 고장 등의 이슈에 대한 더욱 적극적인 참여가 요구된다.

3. 진동 자료 수집 시스템 설계 및 개발

3.1 자료 수집 체계

본 연구에서 개발하고자 하는 시스템은 분산된 장비로부터 진동 자료를 실시간으로 취득하여 서버로 취합하되, 취득을 위한 하

드웨어는 고정식 장비와 이동식 장비(스마트폰)로 구분된다. 고정식 장비는 생활 또는 활동 공간 내 콘센트 등의 전원과 Wi-Fi 무선 네트워크에 대한 항시 연결 및 물리적 고정을 가정하였으며, 이동식 장비는 Android 기반의 휴대용 기기를 대상으로 하여 양 장비 모두 원격으로 소프트웨어를 전달함으로써 활용할 수 있다. 이동식 장비의 경우 고정식 장비와 달리 각 장비에서 소모되는 전력 및 데이터 전송량을 최소화하여야 할 필요가 있으므로, 수집 체계는 다종의 클라이언트가 서버에 접속하는 일반적 체계를 따르되 REST(Representational State Transfer) 기반의 데이터 전달 방식과 소켓 기반 연결을 통해 항시 연결을 유지하는 형태를 병용하도록 설계하였다(Fig. 1).

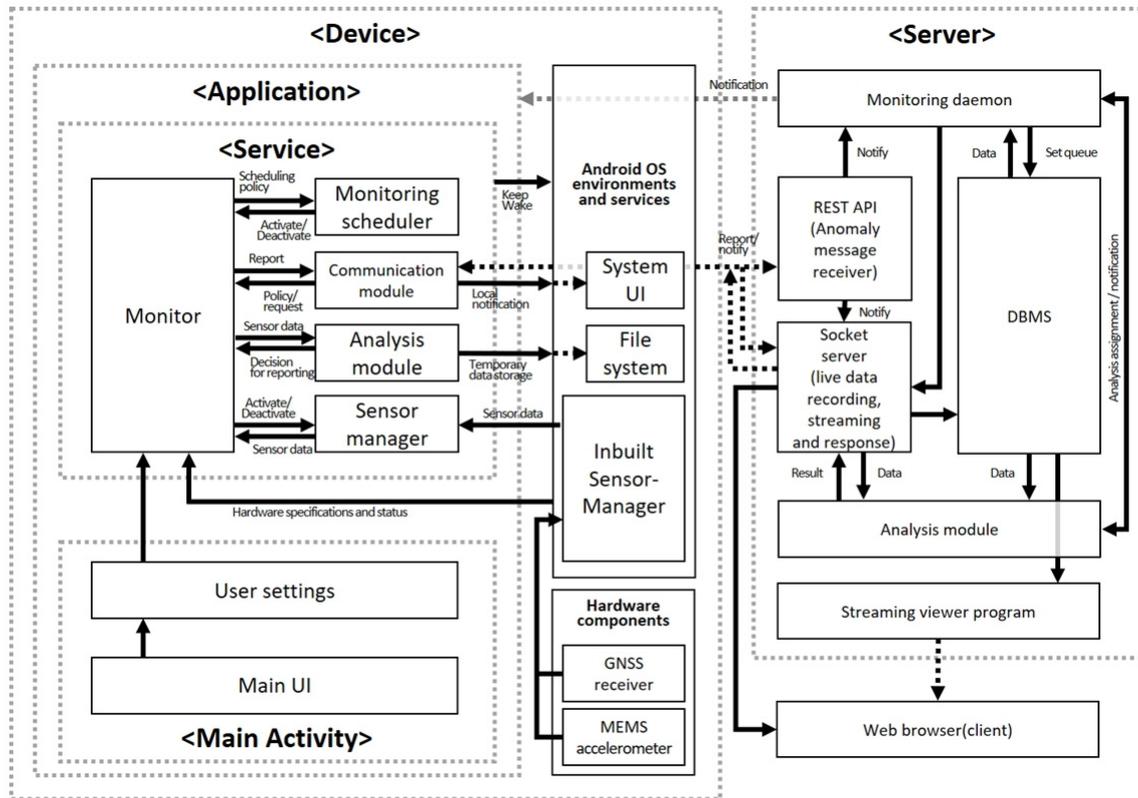


Fig. 1. Overall server-client data flow diagram of proposed data collection system

지반 진동이 장비에 전달되면 해당 진동은 가속도 센서 또는 별도의 ADC(Analog to digital converter)를 통해 최종적으로 디지털 자료로 변환된다. 일반적으로 스마트폰 등의 전자기기에 탑재되는 저가형 MEMS 가속도계의 자료 출력 속도는 최대 8,000 Hz 가량으로서(InvenSense, 2014) 16비트의 출력 해상도를 기준으로 시간당 164메가바이트의 3축 가속도 출력 자료를 생산할 수 있다. 이러한 출력 자료에 시간 및 위치 등의 관련 데이터가 추가될 경우 전체 자료의 크기가 더욱 증가하게 되므로 모든 데이터를 즉시 전송하는 것은 바람직하지 않다.

본 연구에서는 상시 모니터링을 수행하되 이상값이 발생하는 경우 해당 이상 구간의 최대값 및 발생 위치 등의 기초 자료만을 우선적으로 서버에 보고하도록 하였다. 서버에서는 수신된 해당 진동이 단일 장비의 진동인지에 대한 여부를 분석하여 최소한의 지역적 범위를 갖는 진동임이 파악되면 전체 자료를 클라이언트에 요청한다. 이러한 2단계의 필터링 과정을 통해 진동의 발생 여부를 신속히 분석 가능하면서도 클라이언트에게 요구되는 자료의 수집 및 전송량을 효율화할 수 있다.

또한 실시간으로 수집된 자료를 분석 등에 활용하기 위해서는 자료의 취득 속도와 잡음 수준 등의 특성이 균질할수록 이상적이거나, 본 시스템의 경우 특정 OS의 설치 요건을 만족하는 모든 장비의 접속이 가능하므로 클라이언트가 설치된 하드웨어 모델 등의 기반 정보를 함께 수집할 필요가 있다. 그러나 특정 사용자를 구별할 수 있는 고유 정보를 수집할 경우 해당 정보가 개인정보화 되어 장비 추적 등의 오용 가능성이 있으므로, 별도의 사용자 정보를 수집하지 않고 하드웨어 및 운영체제에 대한 기본 정보만 수집하도록 하였다. 수집된 이상값 및 위치 정보는 단순 기반 정보로만 이루어진 클라이언트 식별 정보와 데이터베이스에서 논리적으로 연결되도록 하여 사용자간 구별을 불가능하도록 하면서도 분석 시 특정 하드웨어 또는 센서 자료만을 선별 가능하도록 구성하였다.

3.2 서버 소프트웨어 구성

본 시스템에서 서버는 클라이언트로부터 전송된 자료를 수집하여 분석/기록하고, 필요에 따라 센서의 진동 구간 자료를 요청하도록 한다. 이에 따라 HTTP(Hypertext Transfer Protocol) REST 서버 프로그램과 소켓 서버 프로그램을 각각 구성하여 상황에 따른 작업을 수행할 수 있도록 하였다.

HTTP 서버는 PHP(Hypertext Preprocessor) 프로그램을 기반으로 REST 메시지를 처리하며, 초기 접속 정보 및 진동 발생 시의 개략적인 정보를 실시간 수신하여 처리한다. 클라이언트에서 전송되는 이상값 정보나 서버로부터의 자료 전송 요청과 같은 통신에서는 지속적인 연결이 불필요하며 단일 전송에서 많은 자료를 전송하지 않으므로, 이러한 통신을 위하여 API(Application Programming Interface)를 개발하여 필요 시 접속하는 형태로 구성하였다.

소켓 서버는 Node.js 기반으로 구현되었으며, 접속 시 지속적인 연결을 통해 실시간 센서 출력값의 전체 수집이 가능하도록 개발하였다. 이러한 기능을 활용하면 기반 진동 자료의 수집뿐 아니라 추가 환경 센서를 이용한 생활공간 정보의 실시간 모니터링 및 조화가 가능하므로, 참여자가 고정식 장비를 적절한 주변 환경에 위치시키도록 하는 동기를 부여함과 동시에 이를 조회할 수 있는 클라이언트 소프트웨어 등을 통해 활용 및 보상 구조를 다양화할 수 있다.

3.3 클라이언트 소프트웨어 구성

클라이언트는 이동형 및 고정형으로 구분되며, Android OS를 기반으로 개발되 고정식 장비는 IoT를 위해 특화된 Android Things 운영체제를 기반으로 개발하였다. 두 종류의 클라이언트는 거의 유사한 운영체제를 기반으로 하여 대부분의 코드를 공유하나, 고정식 장비는 스마트폰 등과 다르게 I2C(Inter-Integrated Circuit), SPI(Serial Peripheral Interface) 등의 개방된 인터페이스를 통해 다양한 센서의 시험 및 적용이 가능하므로 기존의 Java 또는 C++ 기반의 드라이버를 탑재할 수 있도록 센서 관련 부분을 특화하여 개발하였다.

클라이언트 소프트웨어는 크게 (1)하드웨어 상태를 점검하고 활성화 계획을 담당하는 모듈, (2)통신 모듈, (3)센서 취득 자료를 분석 및 처리하는 모듈, (4)센서 하드웨어와 통신하여 데이터를 취득하는 모듈이 이들을 총괄하는 모니터링 객체와 결합되는 방식으로 개발하였다(Fig. 1). 해당 모듈들은 백그라운드 서비스에 탑재되어 실행되며, 사용자 인터페이스와는 이와 별개로 필요시에만 구동되므로 화면의 차단 등과 관계없이 지속적인 모니터링이 가능하다.

클라이언트가 실행되면 기초 하드웨어 및 운영체제 정보를 우선적으로 송신하여 네트워크 참여에 대한 승인을 얻는 단계를 수행한다. 해당 단계가 완료되면 즉시 모니터링 단계에 진입하며, 이후 약 2초의 샘플 데이터를 취득하여 취득 데이터의 이상을 확인한다. 모니터링은 센서를 활성화시킴에 따라 전력 사용량의 상승을 초래하므로 전체 실행시간 중 일정 비율로만 활성화하도록 설계하

였으며, 일정 주기로 하드웨어 상태를 점검하여 배터리 상태 등에 따라 활성화를 차단하도록 하여 전력 사용량을 최소화할 수 있도록 개발하였다. 센서가 활성화된 상태에서는 지속적으로 최근 취득값들에 대한 표준편차를 계산하며, 해당 값이 안정 상태의 표준값을 초과할 경우 이상값이 발생한 것으로 간주하여 CNN(Convolution Neural Network)을 통한 지반 진동여부 판별을 수행하고, 임시 파일 구성 및 보고 단계를 시작하도록 개발하였다. CNN은 일정 크기의 자료를 신경망에 공급하는 전처리부 이외에 convolutional layer, pooling layer 및 fully-connected layer를 통해 최종적으로 Softmax layer를 통해 분류가 이루어지도록 설계하였으며(Krizhevsky et al., 2012), 훈련에는 CESMD(Center for Engineering Strong Motion Data)의 지진 기록을 사용하였다(Haddadi et al., 2012). 이상값을 보고한 이후의 정기적인 통신에서 서버로부터 전체 자료의 요청이 수신되면 임시 저장된 자료를 서버로 송신하게 되며, 이때 자료의 송수신은 기존 사례와 마찬가지로 Wi-Fi 연결을 통해서만 전송이 되도록 하여 셀룰러망을 통한 자료 전송량을 최소화하도록 하였다(Fig. 2).

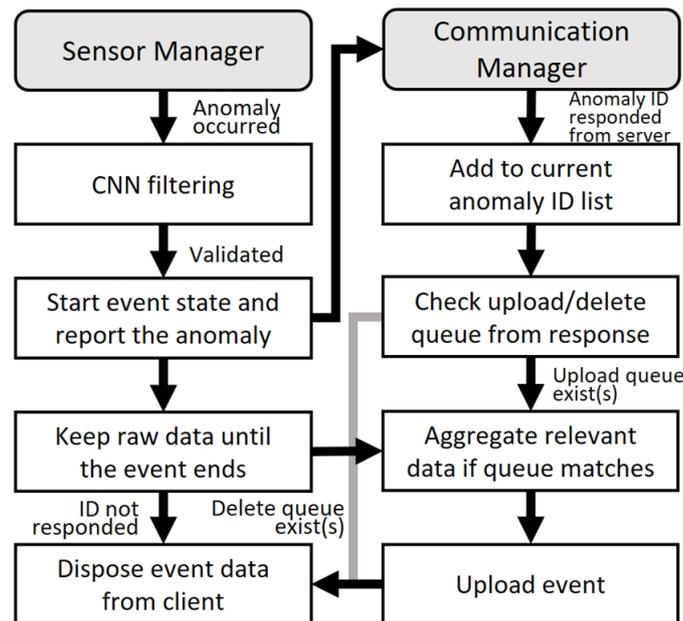


Fig. 2. Data and message handling procedure during ground vibration event

고정식 장비는 항시 전원 및 네트워크 연결성을 갖는 환경에 설치될 것을 가정하였으므로, 이동식 클라이언트의 기능과 더불어 서버에 지속적으로 접속하여 수집된 전체 데이터를 송신할 수 있는 기능을 갖는다. 또한 고정식 장비는 콘센트를 통해 벽체에 고정되는 형태를 상정하여 개발되었으며, 이러한 물리적 고정을 통해 지반 진동에 대한 측정 정확도가 향상되는 장점을 갖게 된다(Kong et al., 2016a). 또한 이동식 장비와 달리 단일 종류의 센서로만 구성이 가능하며, 특정 자세에 고정된 상태에서의 장기 모니터링이 가능하므로 상대적으로 균질한 고품질 자료의 취득을 기대할 수 있다.

4. 토 의

선행 연구 사례들을 포함한 모든 클라우드소싱 기반 지반 진동 정보 수집 서비스들은 진동 정보 수집이라는 단일 목적의 과업이

수행되므로 참여자가 원하는 과업을 선택할 수 없으며, 따라서 참여자가 부담해야 하는 비용과 지급되는 보상의 크기에 따라 참여 정도 및 전체 플랫폼의 효용성이 결정된다(Yang et al., 2012). 기존의 지반진동 수집 사례들은 지진 경보를 수행함으로써 참여에 대한 보상을 제공하나, 이는 사용자의 입장에서 (1)기존 국가 단위의 정보와 마찬가지로 자신이 위치한 지점 근처에서 지진이 일어날 경우 자신에게는 별다른 이득을 주지 못하는 점과 (2)대형 지진이 자주 발생하지 않는 국내와 같은 경우 조기경보만으로는 충분히 참여를 이끌만한 보상이 되지 않는 점 등의 한계를 갖는다. 또한 Dunn et al.(2016)의 연구에 따르면 미국에서의 조기 지진 정보 소프트웨어에 대한 월간 지불 용의 금액(willingness to pay)은 \$1의 중앙값을 가지며, 지역 및 기간에 따라 최소 24%에서 최대 55%의 응답자는 지불 용의가 전혀 없다고 하였다. 이와 같은 응답은 지진을 경험한 적이 있는 사람들을 대상으로도 마찬가지였으므로, 이는 많은 사람들이 기존에 국가가 제공하는 것 이외의 조기 경보에 대한 필요성을 크게 느끼지 못하거나, 별도의 앱 등을 설치하면서까지 해당 서비스를 이용할 의사가 적음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 자원 사용의 최적화 및 다양한 활용 기반의 마련을 통해 참여도를 높일 수 있는 체계를 개발하고자 하였다.

또한 선행 연구에서는 센서의 상시 작동이 전력 소모량에 거의 영향을 주지 않는다고 주장하였으나(Kong et al., 2016a), 자체 시험 결과 센서의 지속적 사용이 장비의 전체 전력 사용량을 크게 증가시키는 것으로 확인되었다. 시험 소프트웨어 이외의 앱 및 서비스가 실행되지 않은 Nexus 5X를 대상으로 배터리 전압이 4345 mV(100%)에서 4080 mV(약 80%)까지 저하되는 시간을 측정하였을 때, MyShake는 평균 7.91시간이 소요되었으며, 본 연구에서 개발한 소프트웨어는 상시 활성화를 기준으로 평균 6.33시간이 소요되었다. 백그라운드 서비스를 유지하되 센서가 활성화되지 않도록 설정하였을 경우에는 33.1시간이 소요되었으므로, 이는 센서의 활성화상태가 대기 상태에 비해 4배 이상의 전력을 소모함을 의미한다. 이러한 경향은 6시간의 간격으로 2시간동안 모니터링 기능을 반복적으로 활성화하여 배터리 전압을 측정한 Fig. 3의 결과와 일치한다. 따라서 본 연구와 같이 휴대용 장비에 탑재된 센서 정보를 지속적으로 수집하기 위한 소프트웨어에서는 보다 적극적인 전력 사용량 절감 기능의 탑재가 요구되며, 이를 위해서는 연산 부하를 포함한 세부적인 최적화가 필요하다. 이외에 본 연구에서 개발 중인 시스템과 기존 개발 사례간의 기능적 차이점을 Table 1에 정리하였다.

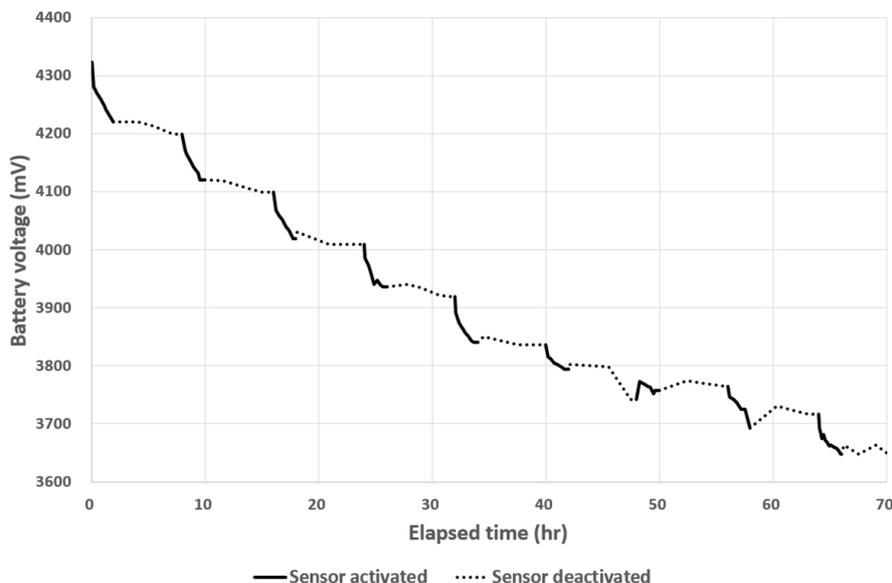


Fig. 3. Result of battery voltage measurement with sensor activated for 2 hours in every 8 hours

Table 1. Comparison of major functionalities between MyShake, Earthquake Network (EN) and proposed system

Functionality	MyShake	EN	Proposed system
OS requirement		Android	
Purpose	EEW and data acquisition	EEW	Data acquisition
Data acquisition rate	25 Hz	Maximum rate allowed from device	
Vibration detection method	ANN	Standard deviation	Standard deviation, CNN
Power usage limit	Limits activation according to battery status	Requires screen off and external power source	Limits activation according to assigned schedule and battery status
Data usage limit	Requires Wi-Fi when transfer large data	One transmission per 180 seconds	Limits monthly data usage, requires Wi-Fi when transfer large data
Live data monitoring		Not available	Available
Stationary client		Not available	Available

5. 결론

본 연구에서는 스마트폰 등의 전자기기에 탑재된 MEMS 가속도계 및 Android Things 기반의 고정형 장비를 통한 클라우드싱 기반의 지반 진동 수집 체계를 제안하고 이를 시범 구현하였다. 개발된 체계는 다중 방식의 클라이언트 및 수집 기법과 자원 사용 최적화를 위한 구조적인 설계를 통해 활용성 및 효율성을 최대화하고자 하였다.

MEMS 센서의 성능은 센서의 발달에 따라 증가하고 있으며(Kong et al., 2016a), 이러한 유휴 자원들은 향후에도 지속적으로 확장될 것으로 기대되는 통신 환경 및 다양한 환경 센서들과의 결합을 통해 다양한 신규 정보들을 창출할 수 있다. 따라서 이들을 활용할 수 있는 기반 기술의 지속적인 개발을 통해 관련 분야에서 활용 가능한 기반 플랫폼을 구성할 계획이다.

사사

본 연구는 2018년도 한국지질자원연구원(KIGAM) 주요사업 재원으로 지원받은 연구과제인 ‘지질환경재해 예측 및 리스크 평가를 위한 Geo-CPS 기반 플랫폼 기술 탐색 개발(GP2018-002 :18-3415)’의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Cartwright, J., 2016, Technology: smartphone science, *Nature* 531.7596, 669-671.
- Clayton, R. W., T. Heaton, M. Chandy, A. K. Krause, M. Kohler, J. Bunn, R. Guy, M. Olson, M. Faulkner, M. Cheng, L. Strand, R. Chandy, D. Obenshain, A. Liu and M. Aivazis, 2011, Community Seismic Network, *Ann. Geophys.* 54, 738-747.
- Cochran, E., J. Lawrence, C. Christensen and A. Chung, 2009, A novel strong-motion seismic network for community participation in earthquake monitoring, *IEEE Instrum. Meas. Mag.* 12, 8-15.

- D'Alessandro, A., D. Luzio and G. D'Anna, 2014, Urban MEMS based seismic network for post-earthquakes rapid disaster assessment, *Adv. Geosci.* 40.40, 1-9.
- Dunn, P. T., A. Y. Ahn, A. Bostrom and J. E. Vidale, 2016, Perceptions of earthquake early warnings on the US West Coast, *Int. J. Disast. Risk Re.* 20, 112-122.
- Feng, M., Y. Fukuda, M. Mizuta and E. Ozer, 2015, Citizen sensors for SHM: Use of accelerometer data from smartphones, *Sensors* 15.2, 2980-2998.
- Finazzi, F. and Fasso, A., 2017, A statistical approach to crowdsourced smartphone-based earthquake early warning systems, *Stoch. Env. Res. Risk A.* 31.7, 1649-1658.
- Finazzi, F., 2016, The earthquake network project: Toward a crowdsourced smartphone-based earthquake early warning system, *B. Seismol. Soc. Am.* 106.3, 1088-1099.
- Haddadi, H., A. Shakal, M. Huang, J. Parrish, C. Stephens, W. Savage and W. Leith, 2012, Report on progress at the center for engineering strong motion data (CESMD), In *Proc. World Conf. Earthq. Eng.*, Lisbon, 1-7.
- Hsieh, C. Y., Y. M. Wu, T. L. Chin, K. H. Kuo, D. Y. Chen, K. S. Wang, Y. T. Chan, W. Y. Chang, W. S. Li and S. H. Ker, 2014, Low Cost Seismic Network Practical Applications for Producing Quick Shaking Maps in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 25.5, 617-624.
- InvenSense, 2014, MPU-6500 Product Specification Revision 1.1.
- Kim, Y., T. S. Kang and J. Rhie, 2017, Development and Application of a Real-Time Warning System Based on a MEMS Seismic Network and Response Procedure for the Day of the National College Entrance Examination in South Korea, *Seismol. Res. Lett.* 88.5, 1322-1326.
- Kong, Q., Allen, R. M., Schreier, L. and Y. W. Kwon, 2016a, MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond, *Science Adv.* 2.2, e1501055.
- Kong, Q., R. M. Allen and L. Schreier, 2016b, MyShake: Initial observations from a global smartphone seismic network, *Geophys. Res. Lett.* 43.18, 9588-9594.
- Krizhevsky, A., I. Sutskever and G. E. Hinton, 2012, Imagenet classification with deep convolutional neural networks, In *Adv. Neur. In.* 1097-1105.
- Pierleoni, P., S. Marzorati, C. Ladina, S. Raggiunto, A. Belli, L. Palma, M. Cattaneo and S. Valenti, 2018, Performance Evaluation of a Low-Cost Sensing Unit for Seismic Applications: Field Testing During Seismic Events of 2016-2017 in Central Italy, *IEEE Sens. J.* 18.16, 6644-6659.
- Qiuping, W., Z. Shunbing and D. Chunquan, 2011, Study on key technologies of Internet of Things perceiving mine, *Procedia Engineer.* 26, 2326-2333.
- Shrestha, A., J. Dang and X. Wang, 2018, Development of a smart-device-based vibration-measurement system: Effectiveness examination and application cases to existing structure. *Struct. Control Health Monit.* 25.3, e2120.
- Yang, D., G. Xue, X. Fang and J. Tang, 2012, Crowdsourcing to smartphones: incentive mechanism design for mobile phone sensing. In *Proc. Int. Conf. Mob. Comp. Networking*, Istanbul, 173-184.
- Zambrano, A. M., I. Perez, C. Palau and M. Esteve, 2017, Technologies of internet of things applied to an earthquake early warning system, *Future Gener. Comp. Sy.* 75, 206-215.