



상시 교량 모니터링을 위한 저전력 IoT 센서 및 클라우드 기반 데이터 융합 변위 측정 기법 개발

박 준 영¹·신 준 식¹·원 종 빈²·박 종 웅^{3†}·박 민 용⁴

¹중앙대학교 건설환경플랜트공학과 학사과정, ²중앙대학교 토목공학과 박사과정,
³중앙대학교 건설환경플랜트공학과 부교수, ⁴반석안전주식회사 상무

Development of Low-Power IoT Sensor and Cloud-Based Data Fusion Displacement Estimation Method for Ambient Bridge Monitoring

Jun-Young Park¹, Jun-Sik Shin¹, Jong-Bin Won², Jong-Woong Park^{3†} and Min-Yong Park⁴

¹Undergraduate Student, Department of Civil Environmental & Plant Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

²Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

³Associate Professor, Department of Civil Environmental & Plant Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

⁴Managing Director, Diagnosis Division, Banseok Safety Corporation, Seoul, 04798, Korea

Abstract

It is important to develop a digital SOC (Social Overhead Capital) maintenance system for preemptive maintenance in response to the rapid aging of social infrastructures. Abnormal signals induced from structures can be detected quickly and optimal decisions can be made promptly using IoT sensors deployed on the structures. In this study, a digital SOC monitoring system incorporating a multimetric IoT sensor was developed for long-term monitoring, for use in cloud-computing server for automated and powerful data analysis, and for establishing databases to perform : (1) multimetric sensing, (2) long-term operation, and (3) LTE-based direct communication. The developed sensor had three axes of acceleration, and five axes of strain sensing channels for multimetric sensing, and had an event-driven power management system that activated the sensors only when vibration exceeded a predetermined limit, or the timer was triggered. The power management system could reduce power consumption, and an additional solar panel charging could enable long-term operation. Data from the sensors were transmitted to the server in real-time via low-power LTE-CAT M1 communication, which does not require an additional gateway device. Furthermore, the cloud server was developed to receive multi-variable data from the sensor, and perform a displacement fusion algorithm to obtain reference-free structural displacement for ambient structural assessment. The proposed digital SOC system was experimentally validated on a steel railroad and concrete girder bridge.

Keywords : digital SOC system, structural health monitoring, long-term monitoring, smart IoT sensor, cloud computing, LTE, displacement fusion algorithm

1. 서론

국내 사회기반시설물은 1970년대 이후의 고속성장과 함께 급격히 건설되며 각종 생산 활동의 기반을 담당하고 경제발전의 중추적인 역할을 했으나, 최근 급격한 노후화나 성능 저하로 인해 시설물들의 모니터링 및 유지관리에 대한 중요성이 무엇보다 커지고 있다(Song *et al.*, 2008). 현재 교량 유지관리는 ‘시설물의

안전관리에 관한 특별법’에 따라 정기적인 내하력 평가를 통해 정밀안전진단을 수행하는 것으로 이뤄지고 있지만 2020년 청담 1교 부식 및 2016년 정릉천고가 텐던 파손사례를 통해 알 수 있듯(Seoul Facilities Corporation, 2021), 예기치 못한 손상이 발생할 수 있으나 이들을 적절한 시기에 발견하고 유지보수를 수행하기에는 인력 기반의 점검 체계 하에서는 많은 시간과 비용이 소모될 뿐만 아니라 점검속도에도 한계가 있음을 알 수 있다.

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-820-5278; E-mail: jongwoong@cau.ac.kr

Received June 30 2021; Revised August 10 2021;

Accepted August 25 2021

© 2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이러한 어려움을 극복하고자 IoT 센서를 이용하여 교량을 모니터링하는 연구들(Hoang *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2018; Kurata *et al.*, 2013)이 수행되어 왔다. IoT 센서를 활용한 모니터링은 상대적으로 저렴한 센서의 비용, 설치의 편의성으로 주목을 받았으나 실제 현장에서 사용하기에는 주로 사용 중인 통신방식의 한계로 인해 데이터의 안정적인 전송이 어렵다는 단점이 있다. 예를 들어 Zigbee 기반 IoT 센서의 경우 저전력 및 교량 모니터링을 위한 중거리 통신 거리(10m~100m)를 지원하나, 주변 환경에 많은 영향을 받아 데이터 유실이 발생할 수 있으며(Fasl *et al.*, 2012), 상대적으로 낮은 전송속도(250Kbps)로 인해 높은 샘플링 속도를 갖는 데이터를 전송하는 작업에는 어려움을 수반한다. 또한 데이터 중계를 위한 게이트웨이 설치에 요구되어 현장에 센서 외에도 별도의 장비를 설치해야 하는 번거로움이 있다(Lee *et al.*, 2020).

IoT 센서 개발 외에도 구조물의 손상 파악을 위한 다양한 진단 알고리즘들이 개발되어 왔다. 많은 연구들이 구조물에 다수의 센서를 부착해 동적 특성을 추출하고 이를 기반으로 모드형상의 변화를 통해 손상유무 및 위치를 추출하거나(Brownjohn *et al.*, 2003; Farrar and Jauregui, 1998), 유한요소 모델을 개선하여 유한요소 모델을 실제 구조물과 최대한 가깝게 모델링하는 방법에 주력해 왔다(Ferrari *et al.*, 2019). 이러한 직접적인 손상 파악 방법의 대안으로 구조물의 상시 응답을 기반으로 성능을 평가하기 위해 최근 구조물의 가속도 및 변형률 데이터를 이용하여 구조물의 변위를 산출할 수 있는 가속도 기반 방법(Lee *et al.*, 2010) 그리고 데이터 융합 기반 방법(Park *et al.*, 2013)이 개발됐다.

본 연구에서는 디지털 SOC를 위해 다물리량 데이터를 장기간 측정할 수 있는 IoT 센서와 서버 그리고 구조물의 상태 평가를 위해 구조물의 변위를 산정할 수 있는 가속도 및 변형률 융합 알고리즘을 클라우드 컴퓨팅 상에 구현하였다. 개발된 IoT 센서는 3축 가속도 및 3채널의 변형률을 24bit의 높은 해상도로 측정할 수 있고, LTE 모뎀을 장착하여 현장에 부가적인 중계기 없이도 전국 어디서든 센서 연결이 가능하도록 하여 데이터의 신뢰도 및 접근성을 높였다. 동시에 클라우드 서버는 수집 데이터를 바탕으로 고성능의 연산능력을 이용해 개별 센서로는 수행하기 어려운 멀티 메트릭기법을 통한 변위 추정, 딥러닝을 통한 이상치 탐지 및 관리기준치 설정 등 실시간으로 다양한 방식의 구조물 상태진단이 가능하도록 하였다. 제안방법을 검증하기 위해 서울시의 청담 1교에 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)를 설치하여 변위 측정결과를 계측 유선 계측기와 비교하였다. 또한 개발된 시스템을 동일한 청담 1교에 설치 후 장기간 운영 성능 및 구조물의 상시 변위 평가를 진행하였다.

2. 제안 방법

이 장에서는 교량의 다물리량 데이터를 장기간 측정하기 위해 개발한 IoT 센서와 클라우드 컴퓨팅을 위해 서버 시스템을 개발한 내용을 소개한다.

2.1 IoT 센서 개발

개발된 IoT 센서(JANET)의 하드웨어는 다음과 같이 세 부분으로 구성된다(Fig. 1).

- 고해상도 다채널 ADC(Analog Digital Converter)
- 초저전력 EDS(Event Driven System)
- LTE 통신부

ADC(Analog Digital Converter)는 각 센서로부터 받은 데이터를 아날로그 신호에서 디지털 신호로 바꾸어 사용자가 데이터를 정량적으로 이용할 수 있도록 하는 장치로서, 본 센서는

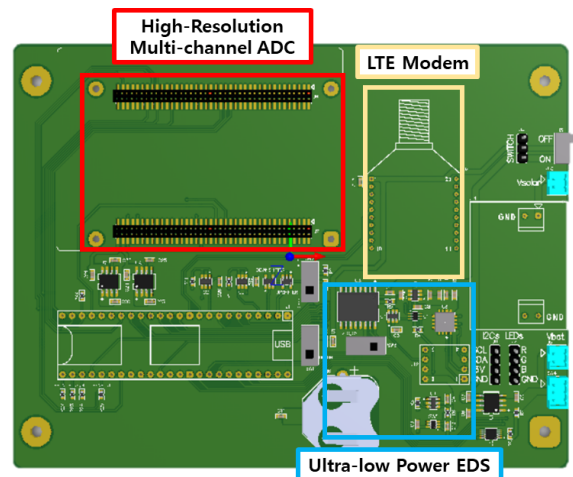


Fig. 1 Components of JANET

Table 1 Specification of IoT sensor system

Parameter	Value
Sensor Type	3-ch Acceleration 5-ch Strain(Max)
A/D Resolution	24-bit
Clock Speed	600MHz
RAM	8MB
Communication Band	LTE-CAT M1
Acceleration Noise RMS	0.2mg
Supply Current	100-200mA(active) 1mA(inactive)
Battery	10500mAh
Solar panel charging	possible

24-bit 해상도, 100Hz 이상의 계측 주파수로 3축 가속도와 3채널 변형률을 동시에 계측할 수 있는 고해상도 다채널 ADC를 탑재하고 있다(Table 1).

JANET은 10500mAh 용량을 갖는 배터리로부터 전원을 공급받고, 태양광 패널을 통해 상시 충전이 가능하여 배터리 교체 없이 장기간 운영할 수 있다. JANET은 EDS 관련 회로와 나머지 회로의 전원부를 분리하여 inactive mode일 때는 EDS 관련 회로에만 전원을 공급하고, 이벤트가 발생해 active mode로 전환되면 전체 회로에 전원이 공급되도록 설계되었다. 이벤트 감지를 위해 Analog Device사의 ADXL362를 사용하였으며, ADXL362 센서가 트리거 되기 전에는 inactive mode로 작동하며 1mA 이하의 전류를 소모한다. 진동이 설정한 역치값(threshold) 이상으로 발생하거나 지정 시간이 되었을 경우, active mode로 전환되어 데이터 계측 및 전송을 끝내고 다시 inactive mode로 돌아간다. Fig. 2는 JANET 센서의 EDS에 의해 계측된 데이터와 상시계측을 비교한 결과로 실험에서 설정된 역치 200mg를 넘을 시 EDS 회로가 작동되어 진동 감지 후 1초 이내로 active 모드에서 계측이 시작됨을 알 수 있다.

IoT 센서 데이터 전송방식에는 Table 2와 같이 4가지 방법이 주로 사용된다. Zigbee와 Bluetooth는 근거리 통신망으로 데이터를 서버에 전송할 경우 게이트웨이를 거쳐 데이터를 전송해야 하지만 LTE와 Lora는 저전력 광역 통신망으로 센서에서 직접 서버로 연결이 가능한 장점이 있다. 본 연구에서 JANET은 센서가 직접 서버로 데이터를 전송하는 stand-alone 시스템을 구현하기 위하여 LTE-CAT M1 통신망을 이용하였다.

Fig. 3은 센서의 mode에 따른 작동의 흐름도를 보여준다.

센서가 트리거되어 active mode로 진입하게 되면 JANET은 사용자가 초기에 지정한 시간만큼 1000Hz 계측 주파수로 3축 가속도와 3채널 변형률을 수집한다. 이후 계측 데이터를 10으로 다운 샘플링(Down Sampling)하고 자체 설계한 Low-Pass Filter를 씌워 계측 데이터에서 고주파 잡음 성분을 제거한다.

전처리가 끝나면 LTE 모뎀을 이용해 서버와 최대 10번 연결을 시도하며, 서버와 연결되면 데이터를 인덱스 순서대로

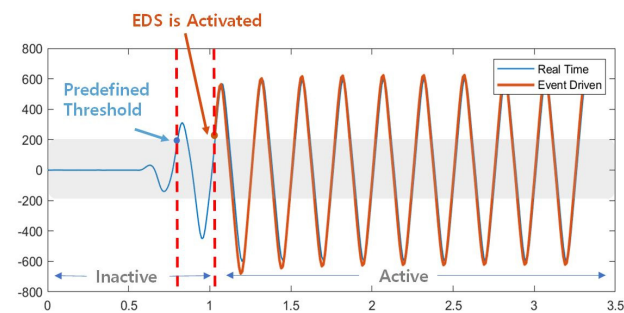


Fig. 2 Event detection and mode switching

Table 2 Specification of IoT sensor system

Standard Name	LTE-CAT M1	LoRa	Zigbee	Bluetooth
Data Rate	5/10Mbps (up link/down link)	< 50Kbps	250Kbps	< 3Mbps
Range	< 11km	< 11km	10~100m	< 10m
Security	Very high	Relatively unknown	Low	Low
Spectrum	Licensed	Unlicensed	Licensed	Licensed
Battery Life	10 years	10 years	15mW	1~30mW

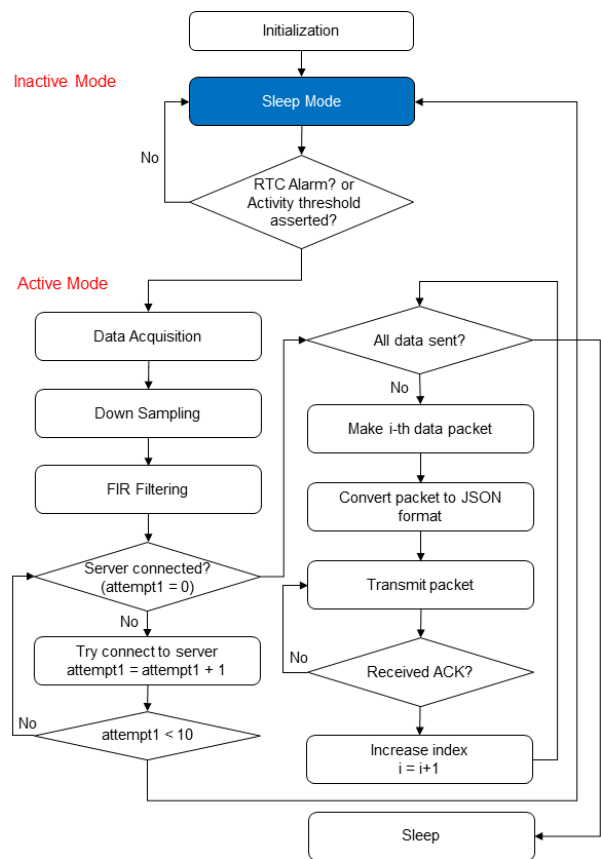


Fig. 3 Flowchart of JANET software

패킷화하여 JSON 형식으로 변환한다. 이후 데이터를 전송하는데, ACK 응답이 돌아오면 다음 인덱스 데이터를 전송하고 ACK 응답을 받지 못하면 데이터를 다시 전송하며 모든 데이터를 보낼 때까지 위 과정을 반복한다. 모든 데이터의 전송이 끝나면 inactive mode로 돌아가 다음 이벤트를 기다린다.

2.2 클라우드 서버 개발

계측 데이터의 체계적인 DB 구축을 위해 데이터 스키마(Data Schema)를 정의하고, 데이터를 저장할 수 있도록 MYSQL 기반의 기본 백엔드 서버 시스템을 제작하였다(Fig. 4). 서버는

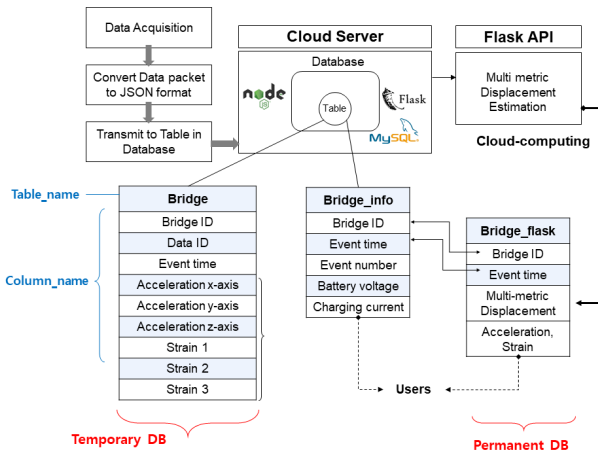


Fig. 4 Basic frame of cloud system and data distribution

센서의 계측 데이터를 LTE 모뎀으로부터 단순 수신하여 일시적으로 저장하는 Temporary DB와 Temporary DB 데이터로부터 클라우드 연산을 통해 산출된 여러 물리량을 함께 저장하는 Permanent DB로 구성된다.

Temporary DB는 Bridge 테이블과 Bridge_info 테이블로 나뉘며 Bridge 테이블에는 교량 ID, 데이터 ID와 계측된 3축 가속도 및 변형률이 저장된다. Bridge_info 테이블에는 Bridge 테이블에서 받아온 교량 ID, 데이터 ID와 함께 센서의 일별 계측 횟수, 배터리 전압, 태양광 충전전류가 저장된다. Temporary DB는 데이터를 영구적으로 보관하지 않고 수집 데이터 중 일부를 Permanent DB에 복사하고 자동으로 초기화한다.

Permanent DB는 Temporary DB로부터 넘겨받은 데이터를 바탕으로 Flask API에 데이터 융합 변위 산정 기법을 내장하여 변형률과 가속도를 변위로 변환하는 과정을 수행한다. 처리된 변위값과 계측된 가속도, 변형률 응답은 Bridge_flask DB에 저장되며 관리자에게 제공된다. 각 DB에 데이터 전송 시 보안을 높이기 위해 사용자의 ID와 PW를 전송받도록 설계해 지정된 사용자만 DB에 접근할 수 있도록 설계하였다.

2.3 데이터 융합 변위 산정 기법

클라우드 서버는 센서로부터 다물리량 데이터를 단순 수신하는 것뿐만 아니라 내장된 멀티메트릭 기반 변위 산정 기법 (Park et al., 2013)을 계측된 가속도와 3채널 변형률 데이터에 적용하여 교량 변위를 실시간으로 자동 변환한다.

변형률과 변위 사이엔 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\mu_{strain} = \Phi q = \Phi \Psi^+ \epsilon = \frac{1}{y} \Phi \Phi^+ \epsilon \quad (1)$$

여기서, Φ 는 구조물의 변위 모드 형상을 의미하며, Ψ 는 구조물의 변형률 모드 형상을 나타낸다. y 는 구조물 중립축의 위치이고 ϵ 는 센서의 계측 변형률을 나타낸다.

하지만 실제 변위와 변형률 기반 변위(ustrain)는 둘 사이에 개형은 일치하지만 크기 같지 않아 산출 변위의 정확한 단위를 알기 어렵다. 이를 위해 멀티메트릭 기반 변위 산정 기법에서 제안된 식 (2)의 calibration factor α 를 산정하고 변형률 기반 변위에 곱하여 변형률 기반 변위를 실제 변위로 변환할 수 있다.

$$\alpha = \sqrt{\frac{S_{strain}^{disp}(f_1)}{S_{acc}^{disp}(f_1)}} \quad (2)$$

여기서, f_1 은 1차 고유진동수를, S는 신호의 power spectral density를 의미한다.

3. 실내 성능 검증

3.1 개발된 가속도 교정

개발된 센서를 교정하기 위해 가속도 모델링 및 비선형 최소제곱법을 이용한 방법을 사용하였다. MEMS 가속도계를 통해 계측한 전압은 다음과 같은 모델의 형태로 표현될 수 있다.

$$V = Sa + O + N \quad (3)$$

$$\|a\|_2 = 1 \quad (4)$$

식 (3)에서 $V_{3 \times 1}$ 은 가속도계로부터 계측된 전압, $S_{3 \times 3}$ 은 Sensitivity, $a_{3 \times 1}$ 은 x 축, y 축, z 축 가속도를 나타내며, $O_{3 \times 1}$ 과 $N_{3 \times 1}$ 은 각각 전압 오프셋, 계측 노이즈를 나타내는 행렬이다. 각 축 별로 정적인 상태에 대한 가속도 데이터를 바탕으로 교정을 진행하는 방식은 식의 개수가 적고 중력 방향으로 정확하게 가속도계를 설치하는데 어려움이 있어 비효율적이다. 따라서 본 연구에서는 가속도를 다양한 방향에서 측정하면서 검교정을 진행할 수 있는 방법을 적용하였다(Fig. 5).

식 (3)과 식 (4)를 이용하여 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} (V - O)^T (S^T S)^{-1} (V - O) \\ = 1 + 2(S^{-1} N)^T a + N^T (S^T S)^{-1} N \end{aligned}$$

우변의 노이즈에 관련된 고차 항인 $N^T (S^T S)^{-1} N$ 은 무시할 수 있으며, $2(S^{-1} N)^T a$ 항은 1×1 행렬로 transpose를 취하면 $2a^T S^{-1} N$ 으로 표현될 수 있다.

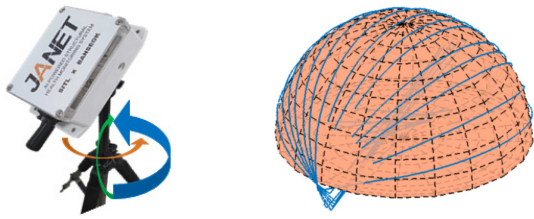


Fig. 5 Calibration setting & trails of acceleration vector

Table 3 Calibration result of sensitivity

Axis	Sensitivity(mV/g)
X	395.8
Y	397.4
Z	405.7

$$r = (V - O)^T (S^T S)^{-1} (V - O) - 1 \quad (5a)$$

$$\approx 2a S L S U P T^{-1} N \quad (5b)$$

따라서, 잔차 r 을 식 (5a)로 정의하면, 식 (5b)로 근사화시킬 수 있으며 이는 정규분포를 따르게 되며 최종적으로 잔차에 대한 비선형 최소제곱 문제를 해결함으로써 행렬 S 와 O 를 구할 수 있다.

실험 결과, sensitivity는 Table 3과 같이 계산되었으며, 센서 제작에 사용된 ADXL354 가속도계의 datasheet에서 제공하는 sensitivity 값인 368 ~ 432mV/g 이내의 값을 확인할 수 있다.

3.2 가속도 및 변형률 노이즈 레벨 검증

개발된 가속도 및 변형률 계측 시스템의 노이즈 레벨을 확인하기 위한 실내 실험을 진행하였다. 변형률계는 Tokyo Measuring Instruments Laboratory사의 강재용 120 Ω 게이지를 사용했으며, 온도 보상을 위해 더미 게이지(Dummy gauge)를 이용한 half-bridge를 구성하여 계측하였다. 이후 캔틸레버보에 변형률 게이지를 부착하고 개발 센서를 통해 진동이 없는 정적인 상태에서의 가속도 및 변형률 데이터를 1000Hz의 Sampling rate로 20초간 계측하여 노이즈 레벨을 분석하였다.

Fig. 6에 따르면 노이즈 계측 실험 결과 가속도의 RMSE(root mean square error)는 0.49mg, 변형률의 RMSE는 1.52us의 노이즈 분포를 이루는 것으로 나타났다. 이를 통해 0.5mg 이상의 진동, 1.52us이상의 변형률이 발생한 경우 개발된 센서가 계측할 수 있음을 확인하였다.

4. 현장 적용 검증

실내 성능 검증 이후 개발 시스템의 현장 적용성을 확인하기 위해 총 2개소의 교량에서 현장 적용을 통한 실험적 검증

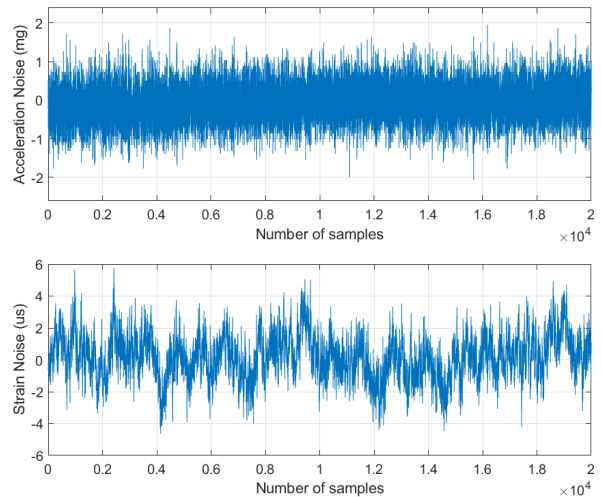


Fig. 6 Noise level of acceleration and strain

수행하였다. 경기도 가평군에 있는 철도 교량 조종천 3교에서 개발 시스템의 데이터 계측 및 변위 측정 성능을 확인했고, 이 결과를 바탕으로 서울시에 있는 청담1교에서는 한 달 이상 운영하며 시스템의 장기 적용성을 검토하였다.

4.1 조종천 3교(철도교) 성능 검증

센서는 경간 중앙부에 설치하였으며, 중앙부, 센서 좌우 10m 간격으로 스틸용 변형률 게이지를 부착하였다. LVDT는 설치 환경의 문제로 최대 변위가 발생할 것으로 예상되는 경간의 3/8 지점에 설치하였다(Fig. 7). 이후 개발 시스템과 변위 비교 시에는 3/8 지점의 변위에 대하여 비교를 수행하였다(Kim et al., 2013).

Fig. 8(a)는 경간 중앙부 지점에서 열차의 이동으로 인해 발생한 수직 가속도이며, Fig. 8(b)는 변형률 게이지를 설치한 각 지점에서의 변형률 데이터를 나타낸다. 대상 교량은 연속교로 부모멘트로 인해 비대칭적인 응답이 나왔으며, 변형률은 최대 15us로 측정되었다.

Fig. 8(c)는 LVDT 측정값과 제안한 변위 추정 기법의 결과를 비교한 그래프로, LVDT의 최대 변위는 0.8780mm로, 제안한 기법의 최대 변위인 0.8795mm와 0.0015mm의 오차, 0.17%의 RMSE 오차를 보여줌으로써 제안 기법의 성능을 검증하였다.



Fig. 7 Jojongcheon 3-bridge

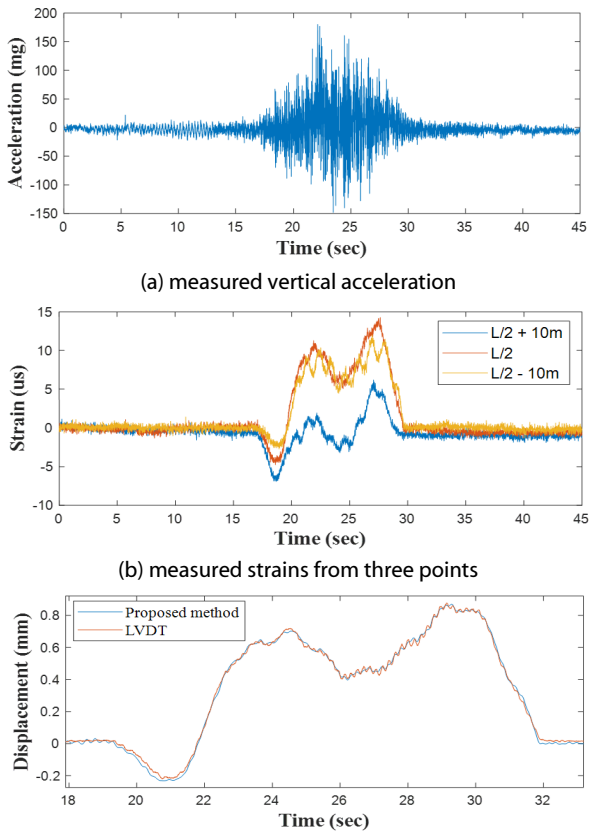


Fig. 8 Measured data

4.2 청담 1교(콘크리트 거더교) 성능 검증

장기 모니터링의 가능성 평가 실험은 서울에 위치한 청담 1교에서 진행되었다. Fig. 9에 교량의 9개의 거더 중 3번째 거더에 센서를 설치하였으며, 설치된 센서는 장기간 운영을 위해 태양광 패널을 통해 전력을 공급받도록 하였다.

센서는 3채널 가속도 및 3채널 변형률을 측정할 수 있도록 설정하였으며 가속도는 중앙부, 변형률은 중앙부와 중앙부 기준 좌우로 7m씩 떨어진 두 곳에 설치하였다.

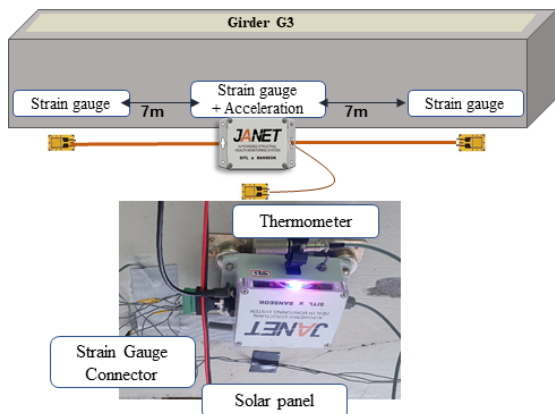


Fig. 9 Sensor installed at Chung-dam 1 bridge

Table 4 Bridge_info table

0	4.081477	2021-05-17 13:41:34
1	4.072322	2021-05-18 05:25:53
2	4.097957	2021-05-18 08:03:06
3	4.064387	2021-05-18 08:52:36
4	4.051569	2021-05-18 09:12:41
...

센서는 사용자가 지정한 시간 및 임계 가속도 초과 시에만 계측하도록 하였으며, 지정한 시간은 매일 오전 8시 정각, 설정한 진동 임계치는 150mg였다. 진동 이벤트의 경우, 중차량 통행 시 설정된 임계치를 초과할 경우 1초 이내로 계측을 시작한다. 센서 계측은 100Hz, 30초로 설정하였으며 계측 후 3000개의 데이터를 서버로 업로드한다. 데이터 수는 변경이 가능하며 기본값으로 30초를 설정하였다. 클라우드 서버는 매 이벤트 발생 시 수신된 데이터 수를 기록하며 설정된 3000개가 모두 수신되는 경우 해당 이벤트를 Bridge_info 테이블에 기록하였다. Table 4는 센서의 계측 이벤트를 나타내는 Bridge_info DB를 보여준다. 해당 DB는 센서 데이터가 성공적으로 업로드된 경우에만 기록되므로 이를 통해 EDS가 작동 여부 및 이벤트 시 센서의 전압상태를 파악할 수 있다.

Fig. 10은 누적된 Vbat를 날짜별로 나타낸 그래프로 태양광 패널에서 전력을 공급받은 배터리 전압이 4.1 V 부근에서 충전/방전을 반복하며 일정한 범위 내에서 움직임을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 측정된 모든 가속도를 주파수 상에서 분석한 결과이다. 가속도의 주파수 분석을 통해 청담 1교의 1차 고유진동수는 약 4.68Hz로 나타남을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 계측된 가속도 및 변형률과 클라우드 컴퓨팅을 통해 계산된 변위를 함께 보여준다. 참고로 변위 검증을 위해 현장에 LVDT를 설치하여 계산된 변위와 직접 계측된 변위를 비교하였다. 해당 이벤트의 계측 시 가속도는 최대 35mg, 변형률은 37us로 관측되었으며, 계산된 변위는 2.18mm로 평가되었다. 해당 변위를 LVDT 결과와 비교한 결과 총 3개의 계측된 변위의 최댓값은 2.08mm, 1.01mm, 1.26mm였으며, 제안된 방법을 통해 측정된 값은 2.18mm, 1.09mm, 1.31mm로 0.1mm 이내의 오차범위로 변위 측정이 가능함을 확인하였다.

Fig. 13는 본 제안시스템을 통해 측정된 변위 중 0.3mm 이상인 변위들의 분포를 나타낸 그래프이다. 상시 진동 하에서의 변위가 0.3mm를 지속적으로 유지하므로 변위 분포 평가를 위해 0.3mm 이하의 작은 변위는 제외하였다. 이후 측정된 변위를 가우스 혼합 분포 모델을 이용하여 모델링 하여 함께 표시하였다. 분석결과 0.4 ~ 0.6mm 사이의 변위를 발생시키는 데

이터가 전체의 67%로 가장 빈도가 높았으며, 전체의 약 10% 빈도로 2mm 이상의 변위가 발생하고 최대 변위는 2.18mm 로 관측되었다. 이를 통해 청담 1교의 경우 대부분 승용차 통행이 주를 이루며, 낮은 빈도로 대형 화물 차량이 통행하는 교량이라는 것을 알 수 있다.

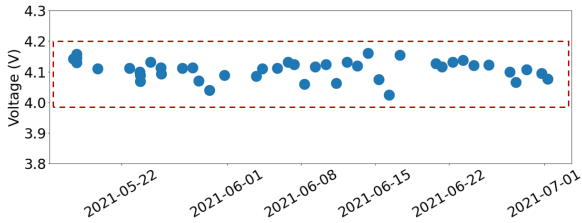


Fig. 10 Vbat history

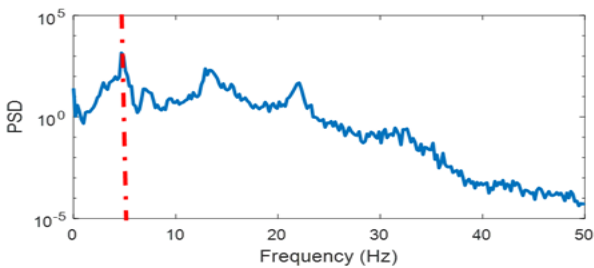


Fig. 11 Acceleration in frequency domain

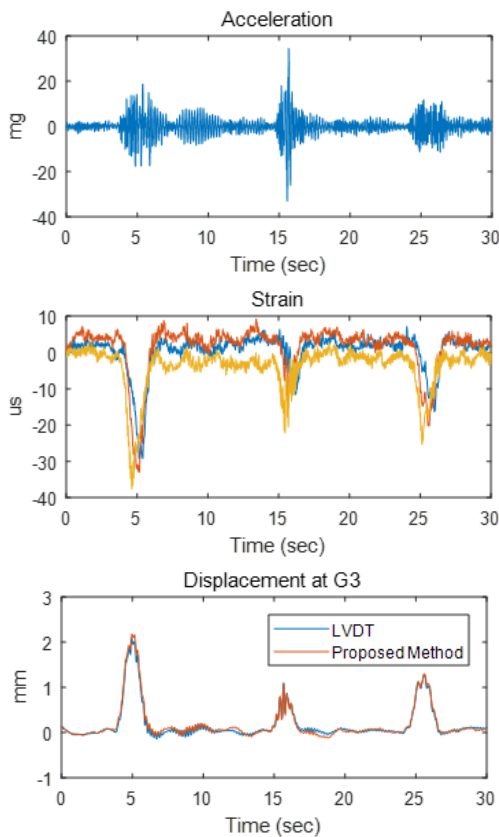


Fig. 12 Acceleration, strain and computed displacement from Chung-dam 1 bridge

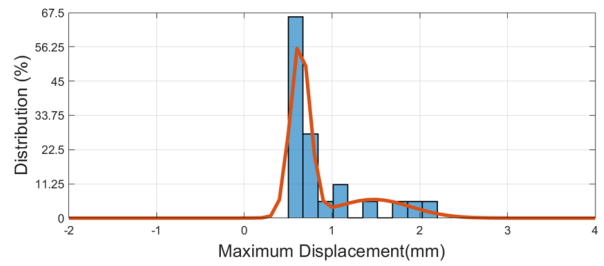


Fig. 13 Maximum displacement distribution during 1 month of proposed system operation

5. 결론

본 연구에서는 구조물의 디지털 SOC를 위하여 다 물리량 계측이 가능한 IoT 센서를 개발하고 데이터 이력 수집 및 고성능 연산처리를 위한 클라우드 서버를 개발하였다. 개발된 IoT 센서는 3채널 가속도 및 3채널 변형률 계측이 가능한 다물리량 센서일 뿐만 아니라, 장기간 운영을 위해 event driven 시스템, 그리고 LTE 기반의 통신 시스템을 갖추고 있어 고성능 데이터 취득이 가능하며 설치가 용이한 시스템으로 개발되었다. 개발된 센서와 함께 멀티메트릭 데이터에 기반한 변위 측정 알고리즘이 클라우드 서버에 구현되어, 계측과 동시에 변형률 및 가속도 데이터를 변위로 변환하여 구조물의 상시 거동 측정이 가능하도록 개발되었다.

개발된 시스템은 강박스 교량인 조종천 3교에서 유선 변위 측정장치 LVDT와의 비교를 통해 변위 측정의 성능을 검증하였으며, 콘크리트 거더교인 청담 1교에 장기간 적용을 통해 상시 변위, 가속도 및 변형률을 모니터링하였다. 조종천3교 적용 시 변위 측정의 정확도는 0.17%의 오차를 보여주었으며, 청담 1교에 한 달간 적용 시 변위는 최대 2.18mm 까지 측정됨을 확인하였다.

본 연구는 클라우드 컴퓨팅을 통해 서버와 센서를 연결시키고 데이터 처리를 자동화하는 방안을 제시하였으며, 추후 연구를 통해 논문에서 제시된 IoT 센서-클라우드의 교량 모니터링 방안을 장기적인 교량의 상태 평가 및 관리를 위한 종합 플랫폼으로 개발할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하는 “국토교통기술촉진연구사업(과제번호 21CTAP-C164014-01)”과 “스마트건설기술개발 국가R&D사업(과제번호 20SMIP-A158708-01)”의 지원으로 수행되었음.

References

Brownjohn, J.M.W., Moyo, P., Omenzetter, P., Lu, Y. (2003) Assessment of Highway Bridge Upgrading by Dynamic Testing and Finite-Element Model Updating, *J. Bridge Eng.*, 8(3), pp.162~172.

Farrar, C.R., Jauregui, D.A. (1998) Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to a Bridge: I. Experiment, *Smart Mater. & Struct.*, 7(5), p.704.

Fasl, J., Helwig, T., Wood, S.L., Pasupathy, P., Neikirk, D.P., Raffaelli, F. (2012) Factors Affecting Wireless Network Communication in Monitoring Systems for Steel Bridges, *J. Civil Struct. Health Monit.*, 2(2), pp.87~95.

Ferrari, R., Froio, D., Rizzi, E., Gentile, C., Chatzi, E.N. (2019) Model Updating of a Historic Concrete Bridge by Sensitivity- and Global Optimization-based Latin Hypercube Sampling, *Eng. Struct.*, 179, pp.139~160.

Hoang, T., Fu, Y., Mechitov, K., Sánchez, F.G., Kim, J.R., Zhang, D., Spencer, B.F. (2020) Autonomous End-to-End Wireless Monitoring System for Railroad Bridges, *Adv. Bridge Eng.*, 1(1), pp.1~27.

Kim, E., Park, J.W., Sim, S.H. (2013) Dynamic behavior of Composite Steel Girder Bridge Exceeding Train Speed 350km/h, *J. Korea Acad.-Ind.*, 14(7), pp.3518~3527.

Kim, J.-H., Park, W.-J., Park, J.-O., Park, S.-H. (2018) LoRa LPWAN Sensor Network for Real-Time Monitoring and It's Control Method, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 31(6), pp.359~366.

Kurata, M., Kim, J., Lynch, J.P., van der Linden, G.W., Sedarat, H., Thometz, E., Hipley, P., Sheng, L.-H. (2013) Internet-Enabled Wireless Structural Monitoring Systems: Development and Permanent Deployment at the New Carquinez Suspension Bridge, *J. Struct. Eng.*, 139(10), pp.1688~1702.

Lee, H.S., Hong, Y.H., Park, H.W. (2010) Design of an FIR Filter for the Displacement Reconstruction using Measured Acceleration in Low-Frequency Dominant Structures, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 82(4), pp.403~434.

Lee, K., Kim, J., Ha, M., Cho, K. (2020) Measurement Management System using LoRa, Sensor Node, and Cloud Platform, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 20(6), pp.143~150.

Park, J. W., Sim, S. H., Jung, H. J. (2013) Displacement Estimation using Multimetric Data Fusion, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 18(6), pp.1675~1682.

Seoul Facilities Corporation (2021) Chungdam1 Bridge Smart Load Capacity Assessment Report.

Song, J.K., Jin, H.S., Chung, Y.H., Lee, S.W., Nam, W.H., Jang, D.H. (2008) Web-Based Bridge Monitoring System with Wireless Sensor Network Environment, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 8(5), pp.35~44.

요 지

사회기반 시설물의 노후화에 대응해 이상 징후를 파악하고 유지보수를 위한 최적의 의사결정을 내리기 위해선 디지털 기반 SOC 시설물 유지관리 시스템의 개발이 필수적인데, 디지털 SOC 시스템은 장기간 구조물 계측을 위한 IoT 센서 시스템과 축적 데이터 처리를 위한 클라우드 컴퓨팅 기술을 요구한다. 본 연구에서는 구조물의 다물리량을 장기간 측정할 수 있는 IoT센서와 클라우드 컴퓨팅을 위한 서버 시스템을 개발하였다. 개발 IoT센서는 총 3축 가속도 및 3채널의 변형을 측정이 가능하고 24비트의 높은 해상도로 정밀한 데이터 수집을 수행한다. 또한 저전력 LTE-CAT M1 통신을 통해 데이터를 실시간으로 서버에 전송하여 별도의 중계기가 필요 없는 장점이 있다. 개발된 클라우드 서버는 센서로부터 다물리량 데이터를 수신하고 가속도, 변형을 기반 변위 융합 알고리즘을 내장하여 센서에서의 연산 없이 고성능 연산을 수행한다. 제안 방법의 검증은 2개소의 실제 교량에서 변위계와의 계측 결과 비교, 장기간 운영 테스트를 통해 이뤄졌다.

핵심용어 : 디지털 SOC 시스템, 스마트 헬스 모니터링, 장기 모니터링, 스마트 IoT 센서, 클라우드 컴퓨팅, LTE, 변위 융합 알고리즘