

LoRa 센서네트워크 기반의 무선교량유지관리 시스템 구축

박진오^{1†} · 박상현² · 김경수³ · 박원주⁴ · 김종훈⁵

¹동일기술공사 기술연구소 전무, ²동일기술공사 기술연구소 부장, ³동일기술공사 기술연구소 사원,
⁴한국시설안전공단 특수교관리센터 차장, ⁵한국시설안전공단 특수교관리센터 대리

Bridge Monitoring System based on LoRa Sensor Network

Jin-Oh Park^{1†}, Sang-Heon Park², Kyung-Soo Kim³, Won-Joo Park⁴ and Jong-Hoon Kim⁵

¹Manager Director, Institute of Technology, Dong-Il Inc, Seoul, 05800, Korea

²Director, Institute of Technology, Dong-Il Inc, Seoul, 05800, Korea

³Researcher, Institute of Technology, Dong-Il Inc, Seoul, 05800, Korea

⁴Deputy General Manager, Long Span Bridge Management Center, KISTEC, Jinju, 52852, Korea

⁵Deputy Manager, Long Span Bridge Management Center, KISTEC, Jinju, 52852, Korea

Abstract

The IoT-based sensor network is one of the methods that can be efficiently applied to maintain the facilities, such as bridges, at a low cost. In this study, based on LoRa LPWAN, one of the IoT communications, sensor board for cable tension monitoring, data acquisition board for constructing sensor network along with existing measurement sensors, are developed to create bridge structural health monitoring system. In addition, we designed and manufactured a smart sensor node for LoRa communication and established a sensor network for monitoring. Further, we constructed a test bed at the Yeonggwang Bridge to verify the performance of the system. The test bed verification results suggested that the LoRa LPWAN-based sensor network can be applied as one of the technologies for monitoring the bridge structure soundness; this is excellent in terms of data rate, accuracy, and economy.

Keywords : internet of things, LoRa LPWAN, wireless sensor network, structural health monitoring

1. 서론

국내 사회기반시설에 상당한 비중을 차지하고 있는 교량 구조물은 장기간 운용에 따른 시설물 노후화로 안전성 및 유지관리 측면에서 구조건전성 모니터링이 필요하다.

교량의 구조건전성 모니터링을 위해 국내외 많은 연구들과 개발기술이 현장에 적용되었으며, 하드웨어와 소프트웨어 기술의 발전으로 경제적이고 효율적인 계측 센서와 센서네트워크에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

국내 교량시설물에 적용된 유선 기반 센서네트워크는 현재 까지도 센서네트워크 시스템의 대부분을 차지하고 있으나, 이후 Zigbee, WiFi, Bluetooth 등 근거리 무선통신(PAN: Personal Area Network) 기반 무선 센서네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)와 CDMA, LTE, 5G 기반의 상용 무선네트워크 등으로

발전되고 있다.

최근에 무선통신 분야에 많은 각광을 받고 있는 사물인터넷(IoT: Internet of Things)은 각종 사물에 센서와 통신 기능을 내장하여 인터넷에 연결하는 기술로 교량 등의 시설물 유지관리에 적용하는 많은 연구들이 이루어지고 있다.

이러한 사물인터넷의 LPWAN중에 하나인 LoRa통신기술은 저전력과 초장거리 연결을 목적으로 개발된 사물인터넷 통신 방식으로 넓은 대역폭을 필요로 하지 않으면서 비면허 통신 대역인 ISM 대역을 사용하기 때문에 저렴한 비용으로 센서네트워크 구축이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 사물인터넷 통신 기술 중에 하나인 LoRa LPWAN(Low Power Wide Area Network)을 적용하여 교량 구조건전성 모니터링 시스템을 개발하였으며, 전라남도 영광군 소재에 위치한 영광대교를 대상으로 Test Bed를 통한 설치 및 모니터링을 수행하였다.

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-3400-5621; E-mail: jinoh.park@gmail.com

Received January 2 2020; Revised January 7 2020;

Accepted January 10 2020

© 2020 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.

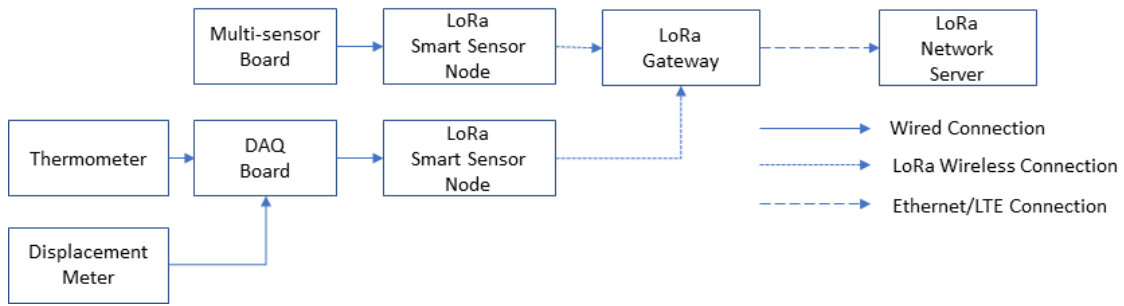


Fig. 1 Structure of LoRa bridge monitoring system

교량 구조건전성 모니터링 시스템 개발을 위해 세부적으로 MEMS 기반의 3축 가속도계를 포함하는 통합센서보드, 이를 이용한 케이블 장력계, 기존 센서 또는 계측기의 신호를 입력받아 LoRa 센서네트워크를 구축할 수 있는 DAQ 보드, 그리고 데이터 분산 처리 및 LoRa 통신을 하는 스마트센서노드를 개발하였으며, 각 하드웨어에 필요한 펌웨어와 통합 시스템 구축을 위한 네트워크 및 어플리케이션 서버를 제작하였다.

2. 본 론

2.1 LoRa 기반 교량 모니터링 테스트베드 개요

본 연구의 Test Bed 검증(Data 송수신 및 신뢰성 등)을 위해 2019년 9월부터 2019년 12월까지 전라남도 영광군에 소재하는 영광대교(사장교 : 연장 590m, 최대 경간장 320m)에 Test Bed 설치 및 모니터링을 수행하였다. 대상 Test Bed는 본 연구를 통해 개발된 MEMS 기반 3축 가속도계를 포함하는 멀티센서보드, 기존 교량 구조 건전성 모니터링에 사용되는 센서의 디지털/아날로그 계측 신호의 수집을 위한 DAQ 보드, 그리고 멀티센서 보드 및 DAQ 보드의 신호를 가공하여 LoRa 신호로 복호화하기 위한 스마트센서노드 등으로 구성된 단말단과 LoRa 신호 수집을 위한 게이트웨이 그리고 LoRa 네트워크 및 어플리케이션 서버로 구성되며, 각 모듈간의 통신 연결은 Fig. 1과 같이 구성되어 있다.

테스트베드의 단말단은 시점부와 종점부 최장 케이블 장력을 계측하기 위한 케이블장력계 2개와 고유진동수 분석을 위해 보강거더 1/2지점에 설치된 3축 가속도계, 시·종점부 보강거더 하부에 설치한 온도계와 신축변위계를 연결한 DAQ 센서노드 2개 등 총 5개의 LoRa 센서노드와 7개의 센서로 구성되었으며, 신호수집을 위한 게이트웨이가 설치되었다.

2.2 LoRa 교량 모니터링 시스템 단말단

구축된 영광대교 Test Bed는 Fig. 2와 같이 교량 시점부와 종

점부 최장 케이블 장력 측정을 위해 2개소에 케이블 장력계를 설치하였고, Fig. 3과 같이 시점부와 종점부의 보강거더 하단에 신축변위계와 온도계를 연결한 DAQ 노드 2개소, 그리고 교량 1/2 지점에 보강거더의 고유진동수 분석을 위해 1개소가 설치되었다. 교량 시점부 종점부 케이블에 설치된 센서노드의 경우 LOS(Line Of Sight) 환경에서 게이트웨이까지 각각 약 100m, 800m 거리에 설치되었으며, 시점부 종점부의 보강거더 하단에 설치된 센서 노드의 경우 non-LOS 환경에서 약 100m, 800m 거리에 설치되었다. Test Bed의 경우 기존 계측기들을 위한 전원 공급 장치가 설치되어 있었어, 이들을 전원 입력원으로 사용하였다.



Fig. 2 Installation of LoRa sensor node and power



Fig. 3 Installation of LoRa sensor node for DAQ

2.2.1 가속도계 기반의 진동해석을 위한 통합센서보드

통합 센서보드는 가속도계 기반으로 사장교, 현수교 등의 케이블 교량의 장력 계측, 주탑의 경사도, 보강거더의 내하력을 산출하기 위해 Fig. 4와 같이 2개의 3축 가속도계와 GNSS, 온도계를 포함하고 있다. 어플리케이션에 따라 샘플링 주파수 조정이 가능하고 LoRa 스마트센서 노드로 계측 원시데이터를 전달하여 FFT 등의 필요한 연산된 Data 값을 LoRa 프로토콜을 통하여 게이트웨이로 전달한다.

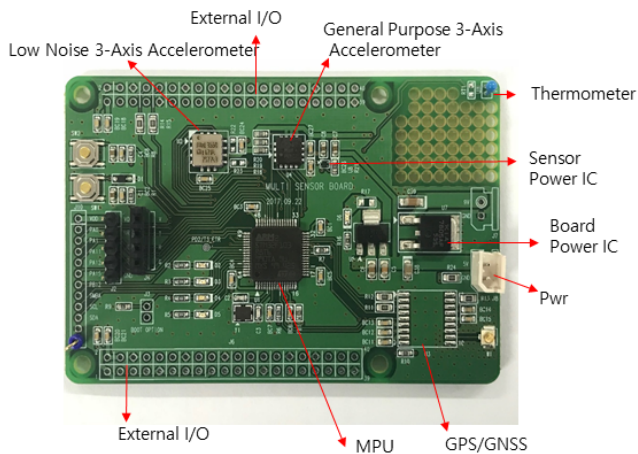


Fig. 4 Multi-sensor board

Test Bed에서 통합센서보드와 LoRa 센서노드는 UART 인터페이스로 직결되어 IP67 등급의 합체와 케이블마운트를 통해 교량 케이블에 설치되었으며, 전원 공급을 위해 케이블 하단의 기존 센서 설치된 DC 12V 전력을 사용하였다.

케이블 장력계는 Fig. 5와 같으며, 샘플링주기(Sampling Rate)는 125Hz에 매 15분 주기(sampling period)로 10분 동안(duration) 케이블 연직 방향(z-axis)의 가속도를 측정하고 원시 가속도 데이터에 대한 FFT(Fast Fourier Transform)처리 후 Multi-vibration method에 의해서 케이블 장력이 도출된다.

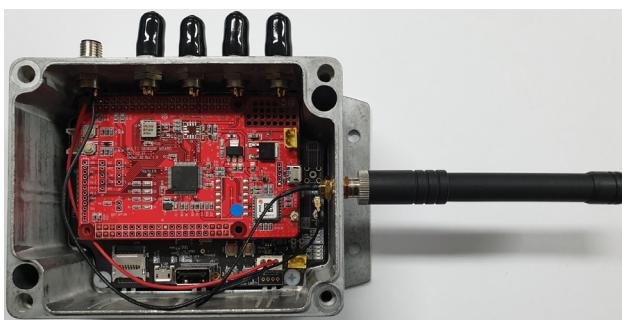


Fig. 5 Assembled LoRa cable tension meter

2.2.2 기존 센서 및 계측기 신호 수집을 위한 DAQ

교량의 구조건전성 모니터링 및 안전관리를 위해서는 진동 해석을 위한 가속도계 외에 변위계, 온도계, 변형률계, 경사계, 처짐계 및 풍향풍속계 등의 다양한 센서 및 계측기가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 MEMS기반으로 구현이 어려운 센서 및 계측기에 대한 계측 신호를 입력받아 LoRa 센서네트워크로 통합하기 위해 DAQ(Data Acquisition)보드를 제작하였다. DAQ 보드는 Fig. 6과 같이 현재 기 사용 중인 다양한 센서 및 계측기의 입력을 고려하여 디지털 입력(RS-232, RS-485)을 위한 2개의 포트와 의 아날로그 입력(전압 타입, 전류 타입, 저항 타입 등)을 위해 4포트로 구성되어 있으며, 아날로그 신호의 경우 신호의 종류에 따라 증폭도를 조절하기 위해 Programmable OPAMP를 탑재하여 미세 신호 입력부터 고준위 신호를 모두 수용할 수 있도록 제작하였다.

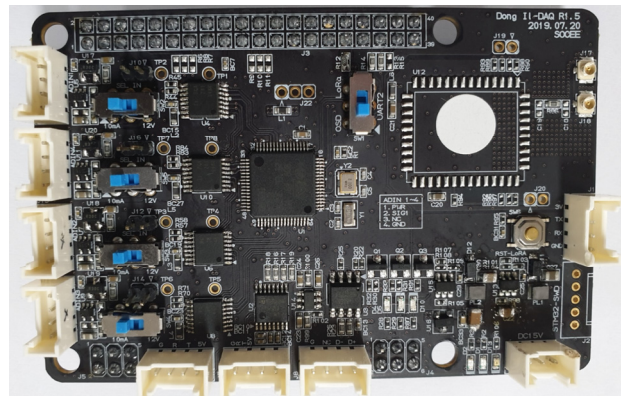


Fig. 6 DAQ board for LoRa smart sensor node

Test Bed에 적용된 DAQ 보드는 Fig. 7과 같으며, 교량 시점부 및 중점부에 보강거더 하단에 온도계와 신축변위계 계측을 목적으로 각각 1개소에 설치되었으며 10초마다 수집된 온도계와 신축변위계의 평균값을 1분 간격으로 압축된 Data를 전송한다.

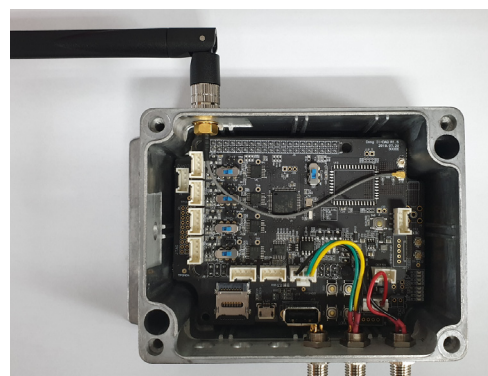


Fig. 7 DAQ assembled unit with LoRa sensor node

2.2.3 LoRa 스마트센서노드

LoRa 스마트센서노드는 입력된 가속도 원시데이터에 대한 FFT(Fast Fourier Transform), 자동 첨두 검출(Auto Peak Detection) 등의 데이터 처리(Data Processing)와 원활한 분산처리를 위하여 Fig. 8과 같이 TI AM3358 1GHz Arm Cortex CPU 모듈을 사용하였으며 LoRa 통신을 위해서는 국내 Wisol LOM 202A LoRa 모듈을 사용하였다. 또한 펌웨어 무선 업데이트를 위해 WiFi 모듈을 장착하였고, 유지관리에 필요한 로그데이터(Log Data) 저장 및 원시데이터 백업 등을 위해 Micro-SD 카드 슬롯이 장착하였다.

진동해석을 위한 통합센서보드와 DAQ 보드를 통한 외부 센서 계측 데이터는 LoRa 스마트센서노드를 통하여 LoRa 센서네트워크로 전송된다. 이러한 과정에서 계산된 케이블의 고유진동수는 Multi Vibration Method에 의한 케이블 장력을 자동 추출한다.

신축변위계와 온도계 등의 DAQ를 통한 아날로그 입력 데이터는 일정 시간간격으로 수집된 데이터 평균값으로 계산하여 LoRa 통신 프로토콜을 통해 LoRa 게이트웨이에 전달한다.

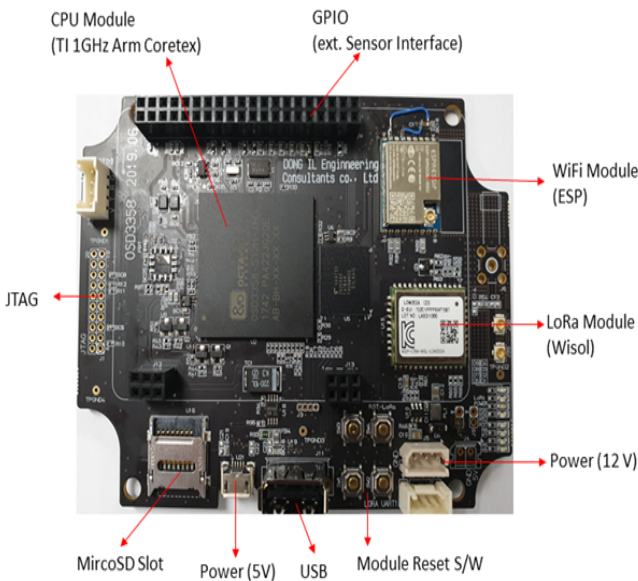


Fig. 8 LoRa smart sensor node

LoRa 스마트센서노드는 외부 전원없이 배터리로 동작을 시켜야 하는 환경을 고려하여 전력소모가 적은 RTOS(Real Time OS)기반의 FreeRTOS로 운영체제를 구성하였으며, 세부적인 LoRa 스마트센서노드의 동작은 Task Diagram은 Fig. 9와 같다.

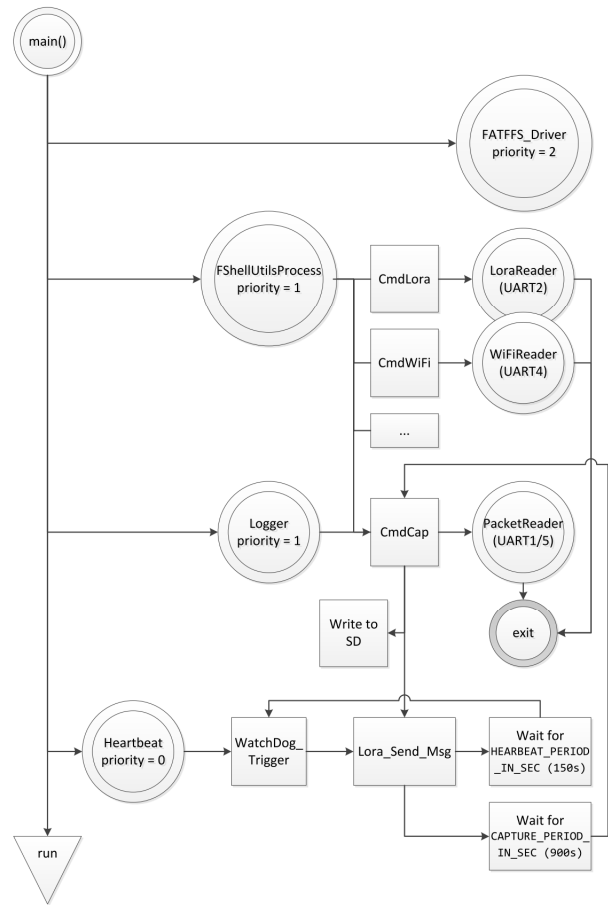


Fig. 9 Task diagram of LoRa smart sensor node

2.3 LoRa 게이트웨이 및 센서네트워크

2.3.1 LoRa 게이트웨이

본 연구의 테스트베드에는 Canada Tektelic社의 Kona Macro IoT 게이트웨이가 사용되었다.



(a) LoRa gateway body in room (b) LoRa gateway antenna in outdoor

Fig. 10 LoRa gateway setup at youngkwang bridge

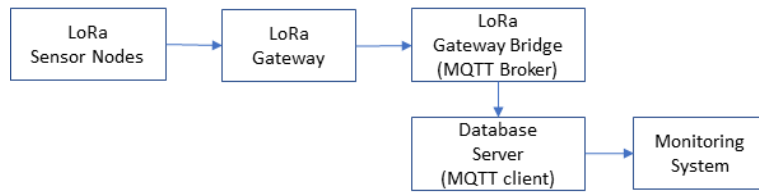


Fig. 11 Data flow of LoRa sensor network's monitoring system

게이트웨이 본체는 Fig. 10과 같이 전원공급 및 안전성을 위해 영광대교 계측동 내부에 설치하였고, 안테나는 연장선 (Extension)을 통해 계측동 외부 팬스에 설치하였다. 게이트웨이로부터 LoRa 네트워크 서버의 연결은 이더넷(Ethernet)으로 연결이 가능하지만, 기존 영광대교에 구축된 계측시스템 네트워크에 영향을 주지 않기 위해 별도의 LTE 라우터를 통해 연결하였다.

2.4 LoRa 네트워크 서버 및 모니터링 시스템

2.4.1 LoRa 네트워크 및 어플리케이션 서버

LoRa 게이트웨이에서 수집된 데이터는 이더넷(Ethernet)을 통하여 LoRa 네트워크 및 어플리케이션 서버로 전달된다. 본 연구에서 적용된 LoRa 서버는 오픈소스 기반의 Chirp Stack LoRaWAN Network Server를 기반으로 구축하였으며, 전체 시스템은 Gateway Bridge, LoRa Network Server, Application Server로 구성된다.

- Gateway Bridge : 게이트웨이의 Packet Forwarder 프로토콜을 JSON 데이터 포맷으로 변환하며 MQTT Broker 로 연결
- Network Server : 게이트웨이로부터 수집된 신호의 인증 (Authentication), 중복관리(De-duplication), Application server 와의 통신과 다운로드 신호의 일정관리 등을 담당
- Application Server : 각 LoRa 단말로부터의 Join 요청을 처리하며, 각 단말의 페이로드(Payload) 데이터의 복호화 (Encryption)를 담당

2.4.2 모니터링 시스템

본 연구에서는 Fig. 11과 같이 구축된 LoRa Network 및 Application Server에서는 직접 계측 데이터를 저장하지 않고, 별도의 모니터링 시스템을 통해서 전송된 데이터를 취합하고 저장하고 있으며, 웹 인터페이스를 통하여 사용자가 모니터링이 가능하도록 구축하였다.

모니터링 시스템은 웹기반으로 사용자가 시스템을 통하여 모니터링 대상이 되는 게이트웨이, 센서노드, 센서들에 대한 정보를 실시간으로 확인할 수 있도록 하였으며, 계측 데이터들은 다양한 시간(실시간, 일간, 주간, 월간, 연간) 단위로 설정하여 데이터를 확인할 수 있도록 시스템을 구축하였다.

2.5 영광대교 Test Bed 운영 결과

2.5.1 LoRa 신호 세기 및 데이터전송률 결과

LoRa의 신호수신율은 단말과 게이트웨이간의 거리와 설치 환경이 영향을 끼친다. 일반적으로 LoRa의 수신 커버리지는 단말의 최대 출력(Maximum EIRP output power)이 20dBm일 경우 LOS(Line of Sight) 환경에서 10Km, non-LOS 환경에서는 5Km 내외로 알려져 있다. 국내 LoRa 통신에 대한 KR920-923 Regional Parameters 규정(Table 1)에 의하여 단말의 최대 출력이 14dBm으로 제한되어 있기 때문에 최대 출력 20dBm 대비 약 4배정도 신호세기가 약해지므로 일반적으로 알려진 최대 커버리지를 얻기는 힘든 환경이다.

Table 1 KR920-923 central frequency, bandwidth, maximum EIRP output

Center Freq. (MHz)	Bandwidth (kHz)	Maximum EIRP output power(dBm)	
		end-device	gateway
920.9	125	10	23
921.1	125	10	23
921.3	125	10	23
921.5	125	10	23
921.7	125	10	23
921.9	125	10	23
922.1	125	14	23
922.3	125	14	23
922.5	125	14	23
922.7	125	14	23
922.9	125	14	23
923.1	125	14	23
923.3	125	14	23

Test Bed에서 적용된 5개의 LoRa 센서노드는 케이블장력 계측을 위해 케이블에 설치된 단말은 LOS 환경이며, 온도계와 신축변위계가 연결된 DAQ 단말의 경우 non-LOS 환경이다.

Test Bed 실험결과 게이트웨이와 가까운 시점부에 설치된 LoRa 센서노드 단말과 약 1Km 거리의 중점부에 설치된 센서노드 Table 2와 같이 모두 최소 -125dBm 이내의 신호세기 (rssi)를 유지하였다. 또한 신호세기(SF: Spreading Factor)에

따라 전송률이 달라지는 LoRa ADR(Adaptive Data Rate)특성 하에서, 시점부 케이블 장력계(acc-start) 단말은 DR5를 지속적으로 유지되고 있으며, 종점부 케이블 장력계 단말 및 non-LOS 환경의 시점부 DAQ 단말 및 종점부 단말 DAQ도 DR4 이상의 양호한 신호세기 값과 데이터 전송율을 유지하고 있음을 볼 수 있다.

Table 2 Signal strength and data rate of sensor node of test bed

Sensor Node	Average rssi (dBm)	LoRa Data Rate (DR)
acc-start	-85	5
acc-end	-115	4, 5
daq-start	-100	4, 5
daq-end	-120	4, 5

2.5.2 LoRa 센서네트워크 전송 성공 확률 결과

LoRa LPWAN은 비면허 ISM대역을 사용하기 때문에 간섭이 발생할 수 있고, 신호가 성공적으로 수신되지 않을 수도 있다. Ferran에 따르면 페이로드의 크기, 단일 네트워크를 구성하는 단말의 갯수에 따라 수신 성공률이 차이를 보이며 페이로드의 크기가 클수록, 단말의 개수가 클수록 수신 성공률이 떨어진다. 또한 수신 성공률은 LoRa 모듈의 Confirmed, Unconfirmed 두 가지 전송 모드에 따라서도 차이를 보인다.

Test Bed에서는 Confirmed 전송 모드를 채택하여 전송 실패 시 계속 전송을 시도하도록 하였으며, Table 3과 같이 시점부, 종점부 DAQ 단말에서 각 1,000개의 계측 데이터를 송신했을 때, 수신 성공률을 제시하였다. Test Bed의 경우 LoRa 단말이 총 5개로 구성되어 네트워크 트래픽 혼잡이 낮지만 대상 DAQ 단말이 일반적인 교량 계측 데이터의 데이터 전송 빈도보다 많은 횟수로(분당 1회) 전송하는 점을 미루어 볼 때, 단일 교량의 구조 건전성 파악을 위한 센서 네트워크 구축에는 충분히 가능할 것으로 판단된다.

Table 3 Number of transmission trial for DAQ terminal devices

Number of Trans. Trial	DAQ(start)	DAQ(end)	Average
1st	914 (91.4%)	920 (92%)	917 (91.7%)
2nd	65 (0.65%)	61 (0.61%)	63 (0.63%)
3rd	5 (0.05%)	3 (0.03%)	4 (0.04%)
4th	0 (0.00%)	2 (0.02%)	1 (0.01%)
5th more	16 (0.1%)	14 (0.04%)	15 (0.07%)
Total	1000	1000	1000

2.5.3 LoRa 센서네트워크의 정확도

LoRa 센서네트워크에서 수신데이터의 정확도는 전적으로 연결된 센서의 정확도에 따른다. 데이터 정확도 검증을 위해 송신된 원시데이터는 LoRa 스마트센서노드의 SD-card 외부 저장장치에 기록하도록 하였고, 테스트베드 결과를 통해 비교 결과, LoRa 무선 통신을 통해 저장장치에 데이터와 수신된 데이터는 정확하게 일치한다.

2.5.4 LoRa 센서네트워크의 동기화 처리

다수의 센서로 이루어진 센서네트워크의 경우 각 센서의 동기화가 중요하다. LoRa 네트워크는 LoRa 게이트웨이로부터 다운로드에 Time TAG가 포함되어 있어, 게이트웨이로부터의 수신된 표준시간으로 동기화가 가능하나 GPS 모듈을 장착한 경우에 가능하고, GPS모듈이 없는 게이트웨이는 표준시간에 대한 동기화가 어렵다. Test Bed에 사용된 Tektelic 게이트웨이는 GPS 모듈을 포함하고 있지 않아서 게이트웨이 다운로드를 통해 시간 동기화는 할 수 없기 때문에 LoRa 센서노드에 포함된 RTC(Real Time Clock)을 통하여 동기화를 수행하였다. 하지만 RTC 배터리의 방전 등으로 표준시간에 대한 오차가 발생할 수 있기 때문에 향후 본 기술에 대한 상용화를 위해서는 게이트웨이나 LoRa 통신 모듈 업데이트를 서버를 통한 동기화 등의 개선이 필요함을 파악하였다.

2.5.5 LoRa 센서네트워크의 자가망 구성에 따른 경제성

본 연구에서 개발한 LoRa 기반 교량 구조건전성 모니터링 시스템은 LTE, NB-Iot 등 상용 통신망 기반의 사물인터넷 방식에 비해 상대적으로 통신 칩셋 가격이 저렴하며, 비면허 통신 대역인 ISM 대역의 LoRa LPWAN 통신을 사용함으로써 자가망 기반의 센서네트워크 구축이 가능하여 무선 통신 비용을 절감할 수 있어서 기존 유선, 근거리통신 기반 WSN 그리고 상용망 기반 센서네트워크 통신 방식에 비하여 저렴하게 센서 네트워크 구축 및 운영이 가능하다.

3. 결론

본 연구를 통해서 교량의 구조건전성 모니터링을 위한 사물인터넷 기반 LoRa LPWAN 센서네트워크 시스템을 구축을 위해 MEMS 기반 통합센서보드, 기존 센서 및 계측기 신호 입력을 위한 DAQ 보드, 분산처리를 위한 스마트센서노드를 설계, 제작하였으며 센서네트워크를 위한 LoRa 네트워크 및 어플리케이션 서버를 구축하였다. 또한 LoRa LPWAN 센서네트워크 시스템의 성능검증을 위해 영광대교에 Test Bed를 구축하고 장기 모니터링을 수행하였다.

Test Bed 모니터링 성능분석결과, 총 5개의 센서노드 및 7개의 센서로 구성된 센서네트워크는 정확성, 신호전송율, 경제성, 설치 및 유지관리 편의성 등에서 교량 구조건전성 모니터링에 적용할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 사물인터넷 기반의 LoRa 센서네트워크를 교량 유지관리 모니터링 시스템으로 적용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(19CTAP-C130248-03)에 의해 수행되었습니다.

References

Ahmed, A., Kumar, Y. (2016) Structural Health Monitoring: Inter of Things Application, *IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems*.

Carmelo, S., Paolo, F.S., Francesco, L., Renato, S.O., Comenico, L.C. (2018) IoT Structural Health Monitoring, *IEEE Instrumentation & Measurement Mag.*, pp.4~14.

Ferran, A., Xavier, V., Pre, T.P., Borja, M., Joan, M.S., Thomas, W. (2017) Understanding the Limits of LoRaWAN, *IEEE Communications Magazine*, pp.1~7.

Kim, J.H., Park, W.J. (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.

Kim, J.T., Sim, S.H., Cho, S.J., Yun, C.B., Min, J.Y. (2016) Recent R&D Activities on Structural Health Monitoring in Korea, *Struct. Monit. & Maint.*, 3(1), pp.91~114.

Lim, J.Y., Lee, J.M., Kim, D.H., Kim, J.D. (2017) Performance Analysis of LoRa(Long Range) according to the Distance in Indoor and Outdoor Spaces, *Journal of KIISE*, 44(7), pp.733~741.

Lora Alliance (2015) A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN, pp.8~11.

Lora Alliance (2018) LoRaWAN 1.0.3 Regional Parameters, pp.53~57.

Park, J.O., Park, S.H. (2018) A Study on the Application of Bridge Maintenance System using LoRa LPWAN Wireless Communication, *J. Korea Inst. Struct. Maint. & Insp.*, 23(1), pp.138~146.

Vilajosana, X., Pere, T.P., Martinez, B., Watteyne, T. (2017) Understanding the Limit of LoRaWAN, *IEEE Communication Mag.*

요 지

사물인터넷 기반의 센서네트워크는 저렴한 비용으로 효율적으로 교량 등의 시설물 유지관리에 적용할 수 있는 한 방안이다. 본 연구에서는 사물인터넷 통신의 하나인, LoRa LPWAN 기반으로 교량 구조건전성모니터링을 위한 시스템을 개발하기 위해서 케이블 장력 모니터링을 위한 센서보드, 기존 계측 센서들과 함께 센서네트워크를 구축하기 위한 DAQ 보드, 데이터들 처리하고 LoRa 통신을 위한 스마트센서노드를 설계 및 제작하였으며 모니터링을 위한 센서네트워크를 구축하였다. 또한 본 시스템의 성능검증을 위해 영광 대교에 Test Bed를 구축하여 교량 구조건전성 모니터링을 위한 센서네트워크에 적용가능성 여부를 살펴보았다. Test Bed 검증 결과 LoRa LPWAN 기반 센서네트워크는 데이터 전송률, 정확도, 경제성면에서 교량 구조 건전성 모니터링의 기술 중에 하나로 적용될 수 있으며, 향후 교량구조물 뿐만 아니라 다양한 공공기반 시설물에 유지관리를 위한 시스템으로 보급될 수 있기를 기대한다.

핵심용어 : 사물인터넷, LoRa LPWAN, 무선센서네트워크, 구조건전성 모니터링