

실시간 모니터링을 위한 LoRa LPWAN 기반의 센서네트워크 시스템과 그 제어방법

김 종 훈¹ · 박 원 주^{2*} · 박 진 오³ · 박 상 현³

¹한국시설안전공단 시설성능연구소, ²한국시설안전공단 특수교관리센터, ³동일기술공사 기술연구소

LoRa LPWAN Sensor Network for Real-Time Monitoring and It's Control Method

Jong-Hoon Kim¹, Won-Joo Park^{2*}, Jin-Oh Park³ and Sang-Hyun Park³

¹Research Institute for Infrastructure Performance, KISTEC, Jin-ju, 52856, Korea

²Long Span Bridge Management Center, KISTEC, Jin-ju, 52852, Korea

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

Abstract

Social infrastructure facilities that have been under construction since the country's high-growth period are undergoing rapid aging, and safety assessments of large structures such as bridge tunnels, which can be directly linked to large-scale casualties in the event of an accident, are necessary. Wireless smart sensor networks that improve SHM(Structural Health Monitoring) based on existing wire sensors are difficult to construct economical and efficient system due to short signal reach. The LPWAN, Low Power Wide Area Network, is becoming popular with the Internet of Things and it is possible to construct economical and efficient SHM by applying it to structural health monitoring. This study examines the applicability of LoRa LPWAN to structural health monitoring and proposes a channel usage pre-planning based LoRa network operation method that can efficiently utilize bandwidth while resolving conflicts between channels caused by using license - exempt communication band.

Keywords : real-time monitoring, wireless smart sensor network, low power wide area network, LoRaWAN

1. 서 론

국내 시설물 안전법 대상인 1, 2종 시설물은 약 8만 7천개가 관리되며, 건설된지 10~29년 사이 시설물 비율이 49.8%에 이른다. 국내 고도성장기(1970년대 이후)부터 본격 건설되기 시작한 시설물들은, 2030년에는 30년 이상된 시설물이 전체의 37%로 확대되는 등 시설물의 노후화가 빠르게 진행되고 있는 실정이다. 따라서, 구조물의 손상과 구조 특성을 감지하여 안전도를 향상시키고 기대수명 연장을 위해서는 경제적인 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM) 기술이 필수적이다. 하지만, 국내 SHM 기술은 대형 센서와 유선 네트워크 기반의 비경제적인 SHM 시스템이 일부 시설물

에만 국한되어 운용 중이다. 전체 SOC시설물에 확대 적용을 위해 반도체 기반의 Micro-Electro Mechanical System (MEMS), Fiber Optic Sensor(FOS) 등 센서 기술의 소형화 및 고도화를 시도하고 있으며, LTE, WiFi, Zigbee 등 무선 네트워크 기술의 접목 등 효율적인 지능형 무선 센서네트워크(wireless smart sensor network, WSSN) 기반의 SHM 시스템 구축을 시도하고 있다.

무선 센서네트워크 및 사물인터넷에 적용되고 있는 무선 통신 기술은 셀룰러, 근거리 통신, 저전력 장거리 통신(low power wide area, LPWA)으로 크게 구분할 수 있으며, SHM을 위한 WSSN에 사용되는 무선 네트워크 방식으로 CDMA, LTE 등의 셀룰러 기반의 통신 또는 Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth 등의

* Corresponding author:

Tel: +82-55-771-1990; E-mail: wjpark@kistec.or.kr
Received October 17 2018; Revised October 24 2018;
Accepted October 25 2018

©2018 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.

근거리 무선통신 방식이 사용되고 있다. 셀룰러 통신의 경우 비싼 단말과 통신 비용, 근거리 무선통신 방식의 경우 수십 m 내외의 짧은 신호도달거리로 인한 한계를 가지고 있다.

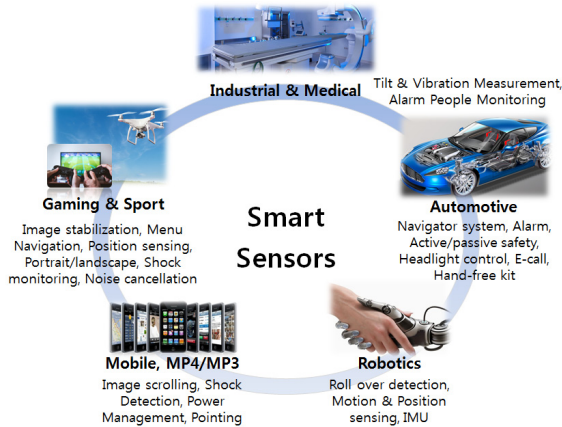


Fig. 1 Various industries using smart sensors

이러한 한계점을 보완하기 위한 저전력 장거리통신(low power wide area network, LPWAN) 기술은 경제성 및 저전력, 장거리 통신 등 LPWAN의 고유한 장점으로 사물인터넷 시대의 통신 시스템으로 주목받고 있다. 특히 구조물 모니터링을 위한 센서네트워크의 경우 이동성 및 초고속 데이터 통신의 필요성이 비교적 적으며, 배터리 동작이 가능한 저전력, 저렴한 구축비용 및 통신 비용과 넓은 신호도달거리 등을 사양을 요구한다. 따라서, LPWAN은 현재 구현된 셀룰러 통신이나, 근거리 무선통신 기반의 WSSN SHM을 보완할 수 있는 훌륭한 대안이 될 수 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 LPWAN 센서네트워크 시스템의 SOC시설물에 적용가능성 및 LoRa LPWAN을 검토하였다. 또한, 비면허 ISM 대역을 사용함으로써 인해 발생할 수 있는 채널간의 간섭을 최소화하여 채널의 동시 점유로 인한 충돌 문제를 해결하고, 대역폭을 효율적으로 활용할 수 있는 새로운 LoRa LPWAN 네트워크 제어방법을 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1 무선 스마트 센서네트워크 기반 SHM

무선 센서기반의 SHM 시스템은 Straser와 Kiremidjian (1988)에 의해 최초로 적용되었으며, 이후 국내·외 전문가에 의해 무선 스마트 센서네트워크 기반 SHM이 시도되었다 (Lynch *et al.*, 2002; Nagayama *et al.*, 2007; Yun *et al.*, 2009; Cho *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2013). 국외의 경우 대표적으로 Tsing Ma Bridge(Chung *et al.*, 2003),

Bill Emerson Bridge 등 교량에 적용이 되었으며, 국내에서도 제2진도대교(Cho *et al.*, 2010), 화명대교(Ho *et al.*, 2012) 등에 구축된 바 있다.

2.1.1 기존의 WSSN

국내 적용된 WSSN 센서는 Intel에 의해 개발된 Imote2를 스마트 무선센서 플랫폼으로 적용하였으며, University Of Illinois에서 개발된 SHM-A, SHM-H 센서보드를 사용하고 있다. Imote2의 경우 통신 방식으로 IEEE 802.15.4 표준의 Zigbee를 채용하고 있으며, 신호 도달 거리는 제한상 약 30m 이나, 외부 안테나를 통해 약 200m까지 확대가 가능하다. 제2진도대교의 경우 총 70여개의 센서노드와 2개의 게이트웨이로 설계되었으며, Cluster tree 방식으로 네트워크 토폴로지(network topologie)를 구성하고 있다.

Table 1 SHM Cost decrease as technology advances (SNU, 2015)

| Item | Tsing ma bridge | Bill emerson bridge | I-35 bridge |
|----------------------|-----------------|---------------------|-------------|
| Total structure cost | USD 929M | USD 100M | USD 234M |
| Year | 1997 | 2003 | 2008 |
| SHM cost | USD 8M | USD 1.3M | USD 1M |
| SHM cost(%) | 0.9% | 1.3% | 0.4% |
| Total sensors | 350 | 86 | 500 |
| Cost per sensor | USD 22,875 | USD 15,116 | USD 2,000 |
| Sensor technology | FOS wireless | Wireless | Wireless |



Fig. 2 Imote2 wireless sensor node platform and SHM-A sensor board

2.2 저전력장거리통신(low power wide area network, LPWAN)

기존의 WSN에서는 사용되던 Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth 기반의 근거리 무선통신은 통신 도달거리가 수십 미터에 불과하여 대형 토목 구조물 등의 넓은 범위의 모니터링을 위한 단일 센서네트워크 구축이 부적절하다.

LPWA 기술은 배터리 동작이 가능한 저전력 소모, 저렴한 단말 및 통신 비용, 넓은 커버리지, 대규모 단말 접속이 가능한 확장성 등의 조건을 충족하는 다양한 통신 프로토콜을 총칭

Table 2 Main Technologies for IoT and wireless sensor network(Northstream, 2016)

| | Traditional cellular | | | Cellular LPWA | | | Proprietary LPWA | | | Short Range | | |
|---------------------------------|----------------------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | 2G | 3G | 4G | LTE Cat.1 | EC-GSM | NB-IoT | SigFox | LoRa | Ingenu | Wi-Fi L.P | Zigbee 3.0 | Bluetooth LE |
| Outdoor coverage | >10km | >10km | >10km | >10km | >15km | >15km | >15km | >10km | <15km | <1km | <300m | <100m |
| Indoor coverage | High | Medium | Medium | Medium | High | High | High | High | Very low | Very high | Medium | Low |
| Energy efficiency | 2-5 years | <10 days | <10 days | >10 years | >10 years | >10 years | 10-20 years | 10-20 years | 10-20 years | 6-12 months | 6-12 months | 6-12 months |
| Typical uplink data rate | 50kbps | 1Mbps | 10Mbps | 1Mbps | 200 kbps | 20kbps | 100bps | 25kbps | 50kbps | 1Mbps | 250kbps | 1Mbps |
| Bidirectional communication | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes | Limited downlink | Yes in class A | Yes | Yes | Yes | Yes |
| Mobility | Very high | Very high | Very high | Very high | High | High | Very low | Low | Medium | Medium | Medium | Medium |
| Localization | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes | n/a | No | Limited accuracy | n/a | Yes | Yes | Yes |
| QoS & Security | Very high | Very high | Very high | Very high | High | High | Very low | Low | Low | Medium | Medium | Medium |
| Device cost | \$5-10 | \$15-30 | \$30-50 | \$20-40 | \$5-10 | \$5 | \$1-5 | \$1-5 | \$5-10 | \$5-10 | \$5 | \$5 |
| Connectivity cost | Medium | High | Very high | High | Medium | Medium | Very Low | Low | Low | Medium | Medium | Medium |
| Scalability | High | High | High | High | Very high | Very high | High | High | High | Low | Low | Very low |
| Future proofness | Medium | Medium | Very High | High | Medium | Very High | Low | High | Low | Medium | High | High |
| Global reach & interoperability | Very high | Very high | Very high | High | High | High | Medium | Low | Very low | Low | Medium | High |

한다. 초기 LPWA 통신의 Sigfox 등 비면허 ISM 통신대역에서 독자기술인 De-facto Standard 계열에서 시작하였으며, LTE-M, NB-IoT 등 3Gpp 표준 기반의 셀룰러 계열도 사물인터넷의 확산으로 거대 통신사들은 상용 서비스를 시작하고 있다. 무선 센서네트워크 구축에 활용할 수 있는 기술은 Traditional Cellular, Cellular LPWA, Proprietary LPWA, Short Range로 크게 분류가 가능하며 무선네트워크 기술의 특징은 Table 2와 같다.

2.2.1 LPWAN 네트워크 구성

Zigbee와 같은 근거리 통신의 경우 짧은 신호 도달거리로 인해 넓은 지역에서 단일 센서네트워크 구축을 위해서는 게이트웨이로 신호 전달을 위한 리피터(repeater)를 포함해야 하므로, 메쉬토폴로지(mesh topology) 형태의 상대적으로 복잡한 네트워크 토폴로지를 가지지만, 이에 반해 신호도달 거리가 10km 내외에 이르는 LPWAN의 경우에는 필드에 있는 각 단말이 리피터의 중계를 거치지 않고 게이트웨이에 직접

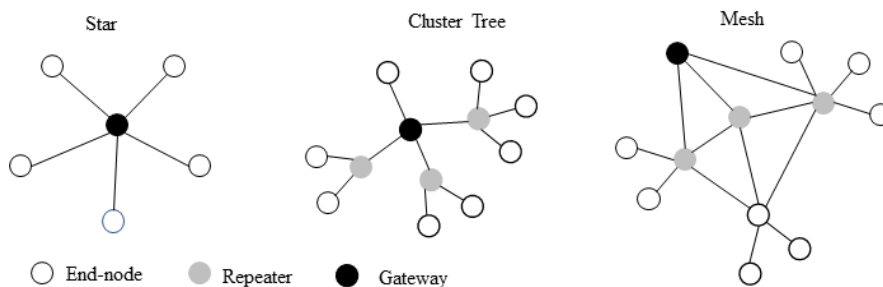


Fig. 3 Network Topologies of wireless sensor network

연결되는 스타토폴로지(star topology) 형태의 네트워크 구성이 가능하다. 스타토폴로지의 경우 게이트웨이와 단말의 거리가 멀어질수록 지연시간(latency)가 발생하며, 에너지 소모가 커질 수 있다. 메쉬토폴로지의 경우 각 단말은 항상 깨어있는 상태여야 하지만, 스타토폴로지의 경우 메시지 전송시에만 깨어있고, 그 이외에는 오프상태여서 전체적으로 에너지 소모를 줄일 수 있다.

2.3 LoRa LPWAN

LoRa(long range)는 장거리 통신과 저전력을 목표로 개발된 통신 프로토콜로써, Semtech Cooperation에서 특허를 소유한 비표준기술이다. 물리 계층 디바이스가 복수개의 기지국에 접속 가능하여 최적의 경로로 네트워크에서 디바이스 데이터 전송이 가능하며, 디바이스와 게이트웨이간의 연결 단순화로 구축 비용이 저렴하며 오픈소스 기반으로, 2013년 초에 결성된 IBM, Semtech, Actility, Microchip 등의 멤버로 구성된 LoRa Alliance에서 2015년 6월 발표한 LoRaWAN 1.0 개방형 표준이다. IEEE 802.15.4g 표준 기반의 비동기식 저전력 원거리 통신망이다.

LoRa Alliance를 통한 Ecosystem이 구축되어 있으며 어플리케이션의 필요에 따라 맞춤화(customized deployment)가 가능하다(Kim *et al.*, 2016). 네트워크 구조는 다수의 센서 단말들이 하나의 게이트웨이에 스타토폴로지 구조로 연결되며, 게이트웨이에서 네트워크 서버까지는 이더넷이나, 3G/4G 등의 이동통신망으로 연결되는 구조이다. Fig. 4는 LoRa 네트워크의 구조를 도식화한 것이다.

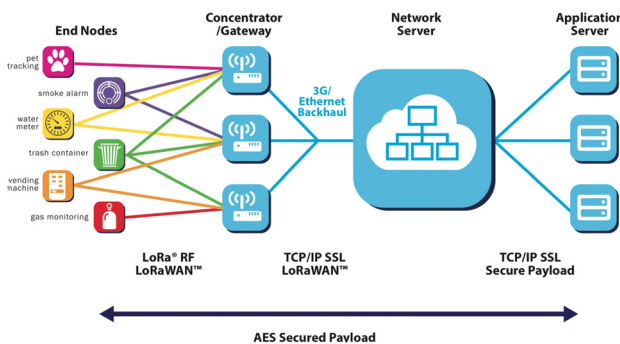


Fig. 4 LoRa network architecture(LoRa Alliance, 2010)

2.3.1 LoRa LPWAN의 구조 및 특징

LoRa WAN 네트워크(LoRa wide area network, LoRa WAN)의 구조는 단말기(end nodes), 게이트웨이, 네트워크 서버, 어플리케이션 서버의 4개의 메인 블록과 네트워크 보안을 위한 AES 128 암호화를 사용하여 네트워크 세션키(network

session key)와 어플리케이션 세션키(App. session key)를 제공한다.

LoRa의 데이터 전송속도(data rate)는 확산인자(spreading factor, SF)에 따라 데이터 전송속도는 DR0에서 DR5까지 정의되며, 단말은 환경에 따라 이 중 하나의 데이터 전송속도를 선택해서 동작하게 된다.

Table 3 LoRa data rate, spreading factor and Max. payload size in KR920-923(Lora Alliance, 2018)

| Data rate | Spreading factor | Max. data rate | Max. payload |
|-----------|------------------|----------------|--------------|
| DR0 | SF12 | 250bps | 59bytes |
| DR1 | SF11 | 440bps | 59bytes |
| DR2 | SF10 | 980bps | 59bytes |
| DR3 | SF9 | 1,760bps | 123bytes |
| DR4 | SF8 | 3125bps | 230bytes |
| DR5 | SF7 | 5,470bps | 230bytes |

LoRa는 단말의 배터리 수명과 네트워크의 수용 능력을 극대화하기 위해 Fig. 5와 같이 ADR(adaptive data rate) 방식을 적용하는데, 게이트웨이와의 신호 감도를 기반으로 데이터 전송속도를 동적으로 설정한다.

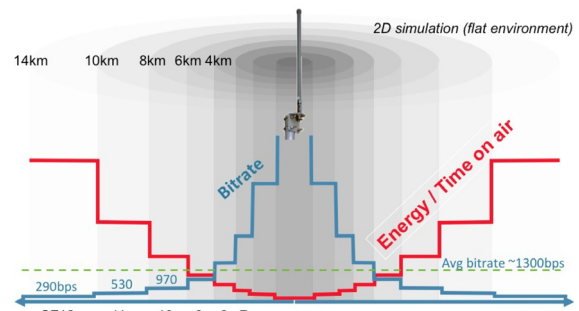


Fig. 5 Adaptive data rate

LoRa는 어플리케이션에 따라서 Fig. 6과 같이 3가지 클래스로 구분되며(Class A, Class B, Class C), Class A가 기본(default)으로 동작하며, Class B,C 는 선택적으로 어플리케이션 환경에 따라 선택적으로 적용할 수 있다.

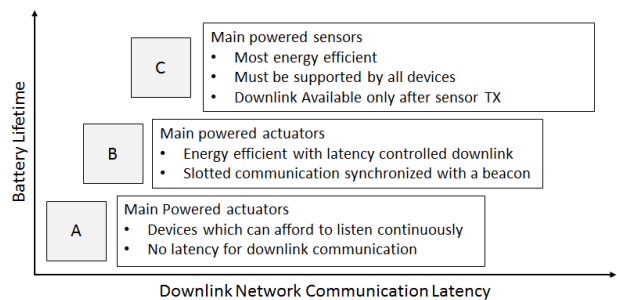


Fig. 6 LoRa classes and battery lifetime and communication latency

기본 Class A의 경우 Fig. 7과 같이 단말은 게이트웨이로 패킷을 송신(Tx)한 후, 두 개의 수신 윈도우(RX1, RX2)를 열고 게이트웨이로부터 확인(ACK)신호를 받는다. RX1은 송신 채널과 동일한 주파수 채널 및 SF를 사용하는데, 이 윈도우 시간 안에 신호를 받지 못할 경우, 별도의 채널인 RX2를 통해 신호를 받는다. Class B의 경우 일정시간 간격마다 수신 상태가 되고 각 RX 에 정해진 시간 동안 게이트웨이로부터 데이터를 수신하게 되며, Class C 는 항상 RX 가능 상태를 유지하는데, 이로 인해 전력 소비가 많아져서 상시 전원공급이 가능한 환경에서 사용된다.

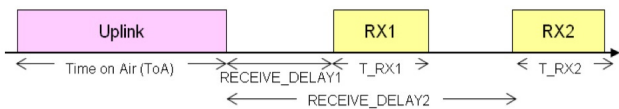


Fig. 7 Uplink transmission procedure of LoRa class A end device

2.3.2 LoRa LPWAN의 국내 RFID/USN 주파수 대역에서의 사용

LoRa는 비면허 주파수 대역인 ISM Band를 사용하는 비표준 기술이다. 비면허 대역에서는 타 무선기기와의 공동 사용을 위해 주파수 호핑(frequency hopping, FH), 송신 전 신호 감지(listen before talk, LBT) 및 Duty Cycle(DC) 중 하나를 사용해야 한다. LoRa 시스템은 EU의 전파환경, 기술 기준을 근거로 제작된 시스템으로 LoRa 규격을 국내 규정에

그대로 적용할 수 없는 문제점이 발생한다. 따라서, 국내에서는 이를 위해 LBT 기준을 적용하도록 하고 있으나, LBT를 사용할 경우 다양한 SF를 갖는 여러 노드들이 동시에 패킷을 전송할 수 있는 LoRa 기술의 장점을 이용할 수 없어 성능이 저하될 수 있다. 그에 따라 2016년 개정된 RFID/USN 기술 기준의 재개정에 대한 논의가 진행 중이다. 또한, 국내 전파법 및 무선 설비규칙 하에서 LoRa 성능을 체계적으로 분석한 연구가 많지 않으며, LoRa LPWAN을 시설물 등의 구조건 전성 모니터링에 적용한 사례도 보고되지 않은 실정이다. 다만, 2017년 실내·외 공간에서 거리에 따른 LoRa 성능에 대한 실험 및 분석이 이루어졌으나, 국내 사용 대역인 920~923MHz 대역이 아닌 미국 기준의 주파수 대역인 915MHz 대역 단말기와 게이트웨이를 통한 실험 및 분석이 수행되었다(Lim *et al.*, 2017). 또한, RFID/USN의 국내 주파수 대역에서 Duty Cycle을 적용했을 때의 이론적 분석이 이루어졌으며 적용 가능성을 시사했다(Yoon *et al.*, 2017).

따라서, 국내 전파 환경의 LoRa LPWAN 센서네트워크

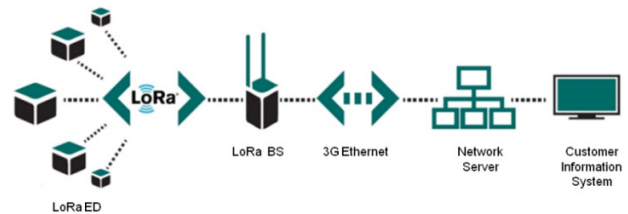


Fig. 8 Configuration of LoRa IoT network

Table 4 Coexistence regulation for RFID/USN band

| | | Manual RFID | USN | Pre-revision(2008) | |
|------------------------|-----|--------------------|--|---|----------------------|
| Coexistence regulation | FH | Channel occupation | Less than continuous 0.4sec | | Same as Left |
| | | Hopping channel | 6 | 16 | Same as Left |
| | LBT | | Pre Tx. more than 0.5ms -65dBm Tx. In less than 4-sec pause more than 50ms | | Same as Left |
| | DC | | 2% (Tx less than 0.4sec in less than 20sec) | 10mW 2% 10~25mW 1% more than 25mW in less than 0.5%(Tx. Complete in less than 0.4sec) | Same as Pre-revision |

Table 5 Maximum throughput and probability of successful transmission for different depolymts (with n=3 channels and 1% duty-cycle)

| Payload(bytes) | 250 end-device | | | 500 end-device | | | 1000 end-device | | |
|--|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| | 10 | 30 | 50 | 10 | 30 | 50 | 10 | 30 | 50 |
| Max. throughput per node(packet/hour) | 367 | 217 | 157 | 198 | 117 | 84 | 89 | 53 | 38 |
| Max. throughput per node(bytes/hour) | 3670 | 6510 | 7850 | 1980 | 3510 | 4200 | 890 | 1590 | 1900 |
| λ of the max. throughput(packets/hour) | 2620 | 1500 | 1090 | 1500 | 870 | 620 | 670 | 390 | 280 |
| Prob. of successful transmission(%) | 14.01 | 14.47 | 10.73 | 13.20 | 13.45 | 13.55 | 13.28 | 13.59 | 13.57 |

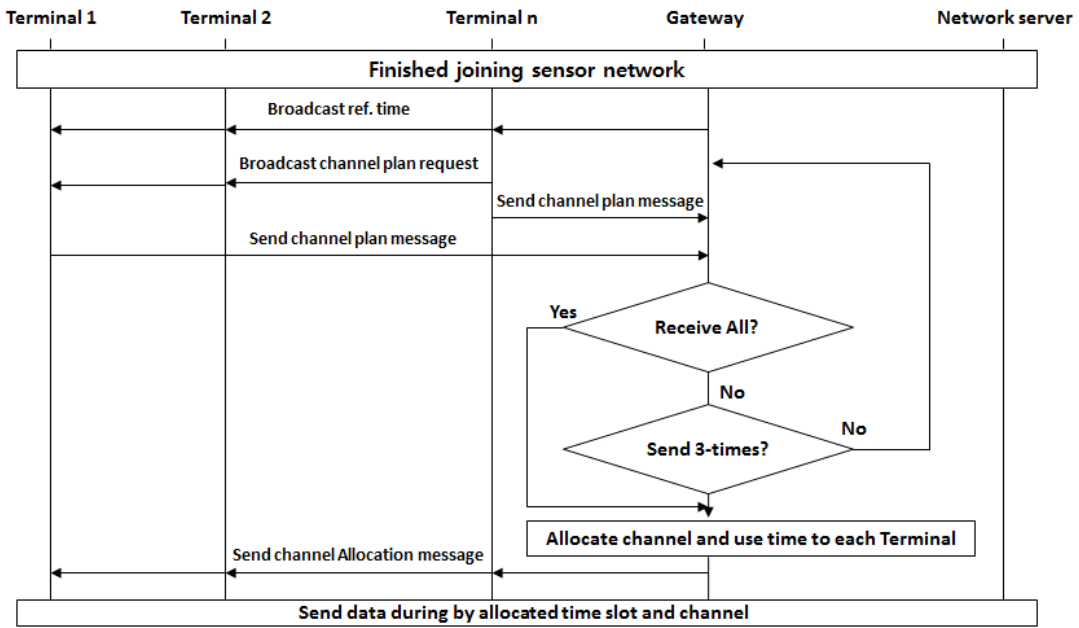


Fig. 9 Flow diagram of channel plan based LoRaWAN control

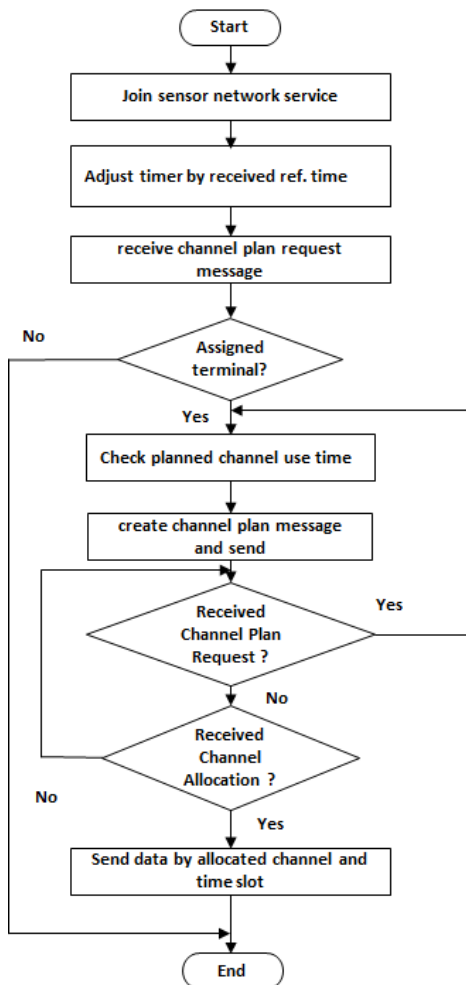


Fig. 10 Flow chart of End device operation in channel plan based LoRaWAN control

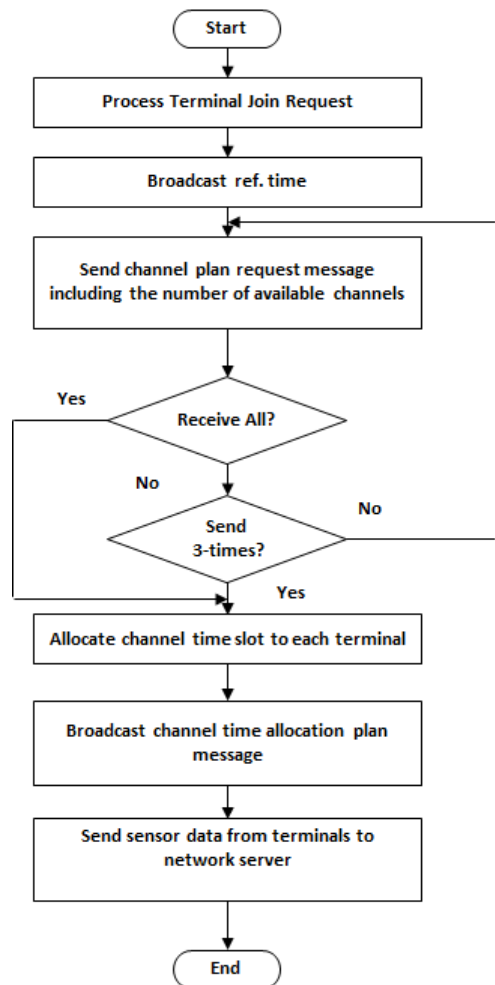


Fig. 11 Flow chart of gateway operation in channel plan based LoRaWAN control

시스템을 적용한 SHM의 적용 가능성 및 성능 분석에 대한 연구가 필요하며, 비면허 대역에서 채널 간섭을 피하고 주파수 대역을 효율적으로 사용할 수 있는 FH, DC, LBT 외의 다른 대안들에 대한 검토가 필요한 실정이다.

LoRa의 물리적인 성능은 2.3.1에서 설명한 LoRa의 PHY/MAC의 구조에서 기인하지만, FH, DC, LBT 등은 LoRa의 성능 및 확장성을 제한하는 가장 큰 요소이며 SHM에 LoRa 적용을 위해서 반드시 고려되어야 할 부분이다. Table 5는 Duty Cycle을 1%로 유지하고 3개의 채널을 사용했을 때 최대 처리율(maximum throughput)과 성공적인 전송의 확률을 나타냈다.

2.3.3 LoRa LPWAN의 SHM 적용 가능성

LoRa LPWAN 기반의 시스템으로 교량 등 대형 구조물에 SHM을 적용하기 위해서는 다양한 센서들로 구성되어야 한다. 또한 실시간으로 센서네트워크에서 발생하는 대량의 데이터를 신속한 처리가 가능해야 한다. 현재 구조건전성 모니터링을 위해 국내·외 교량에 적용되고 있는 계측센서는 변위계, 가속도계, 풍향풍속계 등 다수의 계측센서들이 실시간 모니터링에 사용되고 있으며, 시공기술의 발달로 점차 장대화되고 있어 계측 센서의 수량은 늘어나고있는 실정이다. 또한 간접법을 통한 케이블 장력 산출 등을 위해 일반적으로 100Hz 이상의 샘플링 레이트(sampling rate)로 D/B를 구축하고 있어 전송될 데이터의 양이 증가하고 있는 추세이다.

LoRa LPWAN 기반의 센서네트워크 활용을 위해 송신데이터의 용량의 소형화가 요구된다. 따라서, 스마트 센서노드상에서 FFT(fast fourier transform), PSD(power spectral density) 등의 신호처리를 하여 고유주파수 값을 송신하는 시스템이 필요하다. LoRa 전송 특성을 고려할 때 교량 등에 대한 SHM에 적용할 수 있는 센서네트워크 구축이 가능하다고 판단된다.

2.3.4 LoRa 네트워크 제어 방안

일반적인 LoRa LPWAN 어플리케이션에 비해 SOC시설물의 구조건전성 모니터링을 위해서는 센서의 설치 밀도가 높으며, 높은 Sampling Rate로 인해 전송될 데이터의 크기가 커질 수 있다. 따라서, DC, LBT 적용으로 인한 성능 저하가 LoRa LPWAN의 SHM 적용에 제한 요소가 될 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 채널 사용 사전계획(channel usage pre-planning)기반 LoRaWAN 제어를 제안한다. 게이트웨이는 가입 절차(join procedure)를 완료한 각 단말에 채널 계획 요청 메시지를 전송하고, 이후 각 단말은 채널 사용시간을 포함하는 채널 계획

메시지를 게이트웨이로 전송하고 게이트웨이는 이를 기반으로 각 단말에 대해 채널 및 시간 블록을 할당하여 각 단말에 채널 할당 메시지를 전송한다. 이후 각 단말은 수신된 채널 및 시간 블록을 사용하여 센서의 계측 정보를 게이트웨이로 전송하도록 한다. Fig. 9에서 n 개의 단말이 존재할 때 각 단말과 게이트웨이간의 흐름도를 나타내었고, Fig. 10, Fig. 11에서 각 단말과 게이트웨이에서의 메시지 및 데이터 처리 흐름을 나타내었다.

3. 결 론

LoRa LPWAN 시스템은 저전력, 경제성, 확장성 등의 장점이 있으며, 이를 활용한 센서네트워크 기반의 모니터링 시스템은 저렴한 비용으로 다수의 시설물을 관리할 수 있는 방안이 될 것으로 기대한다. 본 연구에서는 LoRa LPWAN의 구조건전성 모니터링에 적용 가능성 및 네트워크 제어 방안에 대하여 검토한 결과 아래와 같이 도출되었다.

- (1) LoRa LPWAN 시스템은 비면허 무선통신을 이용하고, Mems기반 통합센서를 통하여 무선통신을 구현한 시스템으로 경제성이 있다.
- (2) 센서 노드상에서의 FFT, PSD등의 신호처리를 통해 계산된 고유주파수 값을 송신함으로 LoRa LPWAN 기반의 센서네트워크 구축이 가능함을 확인했다.
- (3) 통신대역의 공동 사용에서 기인하는 간섭을 최소화 하면서 채널 간의 충돌을 방지하기 위한 시스템으로 사전 계획 채널사용 기법을 제안하였다. 향후 SOC시설물의 유지관리 분야 및 환경, 플랜트 분야에도 폭넓게 사용될 것 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C130367-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Cho, S.J., Jung, H.J., Yun, C.B. (2010) Structural Health Monitoring of a Cable-Stayed Bridge using Wireless Smart Sensor Technology : Data Analysis, *Smart Struct. & Syst.*, 6(5-6), pp.461~480.
- Cho, S.J., Yun, C.B., Sim, S.H. (2014) Evaluation of Cable Tension Forces Using Vibration Method for a Cable-stayed Bridge under Construction, *J. Korean Soc. Saf.*, 29(2), pp.38~44.

- 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.
- Kim, S.Y., Park, S.K., Choi, H.D.** (2016) Wide Range IoT Technology and Standardization based on LPWA, *Electronics and Telecommunications Trends*, 2016., pp.95~106.
- Lee, P.Y., Lee, S.Y., Kim, J.T.** (2012) Vibration-based Structural Health Monitoring of Full-Scale Cable-Stayed Bridge Using Wireless Smart Sensor, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 12-1, pp.75~81.
- 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, *J. KIISE*, 44(7), pp.733~741.
- Lora Alliance** (2015) A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN, White paper, pp.8~11.
- Lora Alliance** (2018) LoRaWAN 1.0.3 Regional Parameters, pp.53~57.
- Northstream** (2016) Connectivity Technologies for IoT, Full Report, 2016 Oct.
- Straser, E.G., Kiremidjian, A.S., Meng, T.H., Redlefsen, L.** (2000) A Modular, Wireless Network Platform for Monitoring Structures, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.474.9020&rep=rep1&type=pdf> (accessed October 17 2018)
- Vilajosana, X., Pere, T.P., Martinez, B., Watteyne, T.** (2017) Understanding the Limit of LoRaWAN, *IEEE Commun. Mag.*, 55(9), pp.34~40.
- Yoon, H.G., Um, J.S., Jang, B.J.** (2017) Performance Analysis of a LoRa Device on Duty Cycle Local Regulation of Korea RFID/USN Frequency Band, *J. Korean Inst. Electromagn. Eng. & Sci.*, 28(2), pp.113~119.

요 지

국내 고도성장기 이후 본격 건설되기 시작한 사회 기반 시설물은 노후화가 빠르게 진행되고 있다. 특히 사고 발생 시 대량 인명 피해로 직결될 수 있는 교량, 터널 등의 대형 구조물들에 대한 안전성 평가가 필요하다. 하지만, 기존의 유선 센서 기반의 SHM을 개선한 무선 스마트 센서네트워크는 짧은 신호도달거리로 인해 경제적이고 효율적인 시스템 구축이 힘들다. 따라서 LoRa LPWAN시스템은 사물인터넷의 확산과 더불어 저전력 장거리통신이 각광을 받고 있으며, 이를 구조건전성 모니터링에 응용함으로써 경제적이면서도 효율적인 SHM 구축이 가능하다. 본 연구에서는 LoRa LPWAN의 구조건전성 모니터링에 적용 가능성을 검토하고 비면허 통신 대역을 사용함으로 인해 발생하는 채널간의 충돌을 해결하면서 대역폭을 효율적으로 활용할 수 있는 채널 기반의 LoRa 네트워크 운영방법을 제안한다.

핵심용어 : 실시간 모니터링, 저전력장거리통신, 스마트 무선 센서네트워크, LoRaWAN