

LoRa  
LPWAN  
센서  
네트워크  
및 Big  
Data  
플랫폼  
기반의  
무선  
교량  
유지  
관리  
시스템  
개발

최  
종  
보  
고  
서

2019

국  
토  
교  
통  
과  
학  
기  
술  
진  
흥  
원

# LoRa LPWAN 센서네트워크 및 Big Data 플랫폼 기반의 무선 교량 유지 관리 시스템 개발 최종보고서

2019. 12. 31.

주관연구기관 / (주)동일기술공사  
공동연구기관 / 한국시설안전공단

국 토 교 통 부  
국토교통과학기술진흥원

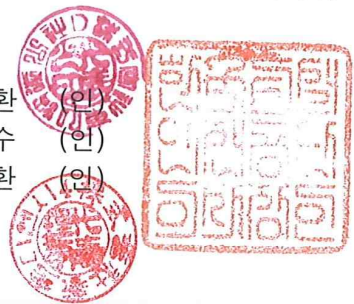
## 제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘LoRa LPWAN 센서 네트워크 및 Big Data 플랫폼 기반의 무선 교량 유지 관리 시스템 개발’  
(연구개발 기간 : 2017.04.01 ~ 2019.12.31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 12. 31.

주관연구기관명 : (주)동일기술공사 (대표자) 황 주 환 (인)  
공동연구기관명 : 한국시설안전공단 (대표자) 박 영 수 (인)  
참여기관명 : 신우디앤시 (대표자) 이 기 환 (인)



주관연구기관책임자: 전 무 박진오  
공동연구기관책임자: 차 장 박원주  
참여기관책임자: 대표이사 이기환

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에  
동의합니다.

## 보고서 요약서

|                   |                       |                                                                                  |                             |               |                                                                          |
|-------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 과제 고유 번호          | 17CTAP-C13<br>0248-01 | 해당 단계<br>연구 기간                                                                   | 2019.01.01~<br>2019.12.31   | 단계구분          | 3단계 / 총3단계                                                               |
| 연구사업명             | 중사업명                  | 국토교통기술촉진사업                                                                       |                             |               |                                                                          |
|                   | 세부사업명                 | -                                                                                |                             |               |                                                                          |
| 연구과제명             | 대과제명                  | LoRa LPWAN 센서 네트워크 및 Big Data 플랫폼 기반의 무선 교량 유지<br>관리 시스템 개발                      |                             |               |                                                                          |
|                   | 세부과제명                 | LPWAN 기반 무선계측시스템 및 Big Data 분석을 위한 플랫폼 개발<br><br>교량시설물 센서규격화, 관리기준, 설치/시공 매뉴얼 개발 |                             |               |                                                                          |
| 연구책임자             | 박진오                   | 해당단계<br>참여연구원 수                                                                  | 총: 17명<br>내부: 17명<br>외부: 0명 | 해당단계<br>연구비   | 정부: 250,000천원<br>민간: 170,500천원<br>정부외: 0천원<br>상대국: 0천원<br>계: 420,500천원   |
|                   |                       | 총 연구기간<br>참여연구원 수                                                                | 총: 41명<br>내부: 41명<br>외부: 0명 | 총 연구비         | 정부: 600,000천원<br>민간: 408,500천원<br>정부외: 0천원<br>상대국: 0천원<br>계: 1,008,500천원 |
| 연구기관명 및<br>소속 부서명 | 동일기술공사 기술연구소          |                                                                                  |                             | 참여기업명 : 신우디앤시 |                                                                          |
| 국제공동연구            | 상대국명: -               |                                                                                  |                             | 상대국 연구기관명: -  |                                                                          |
| 위탁연구              | 연구기관명: -              |                                                                                  |                             | 연구책임자: -      |                                                                          |

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

|                         |   |
|-------------------------|---|
| 연구개발성과의<br>보안등급 및<br>사유 | - |
|-------------------------|---|

### 9대 성과 등록·기탁번호

| 구분           | 논문 | 특허 | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비 | 기술요약<br>정보 | 소프트<br>웨어 | 화합물 | 생명자원     |          | 신품종 |    |
|--------------|----|----|-----------|--------------|------------|-----------|-----|----------|----------|-----|----|
|              |    |    |           |              |            |           |     | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보  | 실물 |
| 등록·기<br>탁 번호 | 5  | 3  |           |              |            | 4         |     |          |          |     |    |

### 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

| 구입기관 | 연구시설<br>· 장비명 | 규격<br>(모델명) | 수량 | 구입연월일 | 구입가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화) | 비고<br>(설치장소) | NTIS<br>등록번호 |
|------|---------------|-------------|----|-------|--------------|-------------|--------------|--------------|
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |

본 연구에서는 M2M에 최적화된 LoRa LPWAN을 이용하여 디지털 통합 센서보드, DAQ, 센서노드를 개발하고, 센서네트워크에서 발생한 대용량의 계측 데이터의 분산 처리(Influx DB 기반)를 위한 Big Data 처리 통합 교량 관리 시스템을 개발하여 교량 유지관리 분야의 새로운 BM을 실현을 목적으로 ① LPWAN 기반의 센서, 센서노드, DAQ 등으로 구성된 무선 계측 시스템의 개발 ② Influx DB 기반의 Big Data 분석을 위한 플랫폼 개발 ③ 교량시설물 유지관리 센서규격화, 관리기준, 설치/시공 가이드(안) 개발을 최종목표로 설정함.

보고서 면수 :  
121페이지

## 〈 요약문 〉

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |        |               |      |      |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------|------|------|
| 연구의<br>목적 및 내용            | <p>본 연구에서는 사물인터넷(IoT) M2M(Machine to Machine) 센서네트워크(sensor Network)에 최적화된 LoRa LPWAN(Low Power Wide Area Network)기반으로 3축 가속도계를 포함하는 MEMS 디지털 통합 센서보드, DAQ, 분산처리 가능한 스마트센서노드를 개발하고, 이들을 기반으로 교량의 무선 자동 계측 및 모니터링이 가능한 시스템을 구축을 목적으로 함.</p> <p>수많은 센서로 이루어진 센서네트워크에서 발생한 대용량의 계측 데이터의 처리를 위한 Big Data 처리 방안과 통합 교량 관리 시스템을 개발하여 노후교량의 안전 및 건전성 판단을 위해 실시간 모니터링하고, Test Bed를 통한 개발된 시스템의 성능검증 및 실용화 방안을 도출하고자함. 또한 무선 계측 센서 규격화 및 세부사양 표준화 방안과 교량 무선계측시스템 운용에 필요한 관리기준 설정도출을 통해 시공(설치)와 유지관리(운용)에 대한 가이드(안) 도출을 연구목표로 설정함</p> <ul style="list-style-type: none"><li>○ 3축가속도계, 온도계, GPS를 포함한 MEMS 기반 통합 디지털 센서 보드설계 및 개발</li><li>○ 실내 Lab Test를 통한 LoRa 센서네트워크 적용가능성 검증연구(Feasibility Study)</li><li>○ 교량 구조건전성 모니터링을 위한 LoRa 스마트 센서노드 및 DAQ 보드 설계 및 개발</li><li>○ LoRa Alliance 표준 및 국내 규약을 기반한 LoRa 기반 무선자동계측 플랫폼 구축</li><li>○ LoRa 스마트 센서노드 및 DAQ 보드 Pilot Test / Test Bed를 통한 성능검증 연구</li><li>○ 대용량 계측데이터 저장, 처리를 위한 Big Data 시스템 적용 방안</li><li>○ 무선계측 센서규격화 및 세부사양 표준화 방안 도출</li><li>○ 교량 무선계측시스템 운용에 필요한 데이터 모니터링용 관리기준 설정도출</li><li>○ 교량 무선계측시스템 시공(설치) 및 유지관리(운용)에 대한 지침 개발</li></ul> |        |               |      |      |
| 연구개발성과                    | <ul style="list-style-type: none"><li>○ LoRa LPWAN 무선송수신이 가능한 MEMS 기반 통합센서보드 및 스마트 센서 노드 개발</li><li>○ 통합센서보드 및 DAQ 인터페이스를 통한 LoRa기반 교량 구조건전성 모니터링 플랫폼 개발</li><li>○ Linux 및 RTOS기반 LoRa 스마트 센서노드 운영체제 개발 및 구현</li><li>○ LoRa 센서네트워크를 위한 네트워크/어플리케이션 서버 및 모니터링 서버 개발</li><li>○ 시계열 데이터베이스 기반의 Influx DB 활용 Big Data 처리 방안 개발</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |        |               |      |      |
| 연구개발성과의<br>활용계획<br>(기대효과) | <ul style="list-style-type: none"><li>○ 활용계획<ul style="list-style-type: none"><li>- 본 과제를 통해 개발된 LoRa 기반 무선자동계측시스템은, 저렴한 비용으로 센서네트워크 구축 및 유지관리가 가능하여, 향후 신설 교량에 대한 시범 사업, 저렴한 노후시설물 관리 플랫폼 개발 등을 통해 적극 사업화</li><li>- 개발된 기술은 자동계측을 필요하는 도로, 터널, 환경, 수자원, 빗물관리 등의 분야에도 응용이 가능하며 응용 사업화모델 개발 및 추진</li><li>- 기상·환경 데이터, 교통량 데이터 등과 같은 다양한 이종 Data가 결합되어 Big Data와 머신러닝 기반의 지능형 시설물 유지 관리로 발전시킬 수 있는 요소기술로 활용가능</li></ul></li><li>○ 기대효과<ul style="list-style-type: none"><li>- 저비용으로 센서네트워크 구축은 모니터링 대상 확대가 가능해지며, 효율성이 낮은 기간 중심의 시설물 유지관리(time based maintenance)에서 정량적 조건 기반 유지 관리(condition driven maintenance)로 전환될 수 있으며, 노후 시설물 의 안전도 향상 및 사회적, 경제적 비용 절감을 기대할 수 있음.</li><li>아울러 글로벌 SOC 시설물 유지 관리 시장은 2020년까지 매년 평균 24.7%의 성장률을 기록하며 34억 달러 시장으로 성장할 것으로 기대되며, 수입 대체 효과 및 기술 수출도 기대</li></ul></li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                               |        |               |      |      |
| 핵심어<br>(5개 이내)            | Big Data                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 센서네트워크 | 교량유지관리<br>시스템 | LPWA | LoRa |

## < SUMMARY >

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Purpose &amp; Contents</b> | <p>In this project, based on LoRa LPWAN (Low Power Wide Area Network) optimized for IoT (M2M) Machine to Machine (IoT) sensor network, MEMS digital integrated sensor board, DAQ, distributed processing including a 3-axis accelerometer It aims to develop possible smart sensor nodes and build a system that enables wireless automatic measurement and monitoring of bridges based on them. The large amount of measurement data generated in the sensor network We will develop a big data processing method and integrated bridge management system for real-time monitoring to determine the safety and soundness of old bridges, and derive the performance verification and practical methods for the developed system through the test bed. In addition, the study aims to derive a guideline for construction (installation) and maintenance (operation) through the standardization of wireless measurement sensors and standardization of detailed specifications and the establishment and management of necessary management standards for bridge wireless measurement system operation..</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Design and development of integrated MEMS-based digital sensor board including 3-axis accelerometer, thermometer and GPS</li> <li>○ LoRa Sensor Network Feasibility Study through Indoor Lab Test</li> <li>○ LoRa Smart Sensor Node and DAQ Board Design and Development for Bridge Structural Health Monitoring</li> <li>○ LoRa based wireless automatic measurement platform based on LoRa Alliance standard and domestic protocol</li> <li>○ Performance verification study using Pilot test / test bed of LoRa smart sensor node and DAQ board</li> <li>○ Integrated bridge management system based on Big Data distribution processing</li> <li>○ Standardization of wireless measurement sensor standardization and standardization of detailed specifications</li> <li>○ Establishment and establishment of management criteria for data monitoring required for bridge wireless measurement system operation</li> <li>○ Development of guidelines for construction (installation) and maintenance (operation) of bridge wireless measurement system</li> </ul> |
| <b>Results</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Development of integrated sensor board and smart sensor node based on LoRa LPWAN wireless transmission and reception</li> <li>○ Development of LoRa-based Bridge Structural Health Monitoring Platform through Integrated Sensor Board and DAQ Interface</li> <li>○ Development and implementation of Linux and RTOS based LoRa smart sensor node operating system</li> <li>○ Development of Network / Application Server and Monitoring Server for LoRa Sensor Network</li> <li>○ Development of big data processing plan using Influx DB based on time series database</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Expected Contribution</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Usage plan</li> <li>– The LoRa-based wireless automatic measurement system developed through this project is capable of constructing and maintaining a sensor network at low cost, and actively commercializing it through pilot projects for new bridges and development of a low-cost facility management platform.</li> <li>– The developed technology can be applied to the fields such as road, tunnel, environment, water resources, rainwater management, etc. that require automatic measurement.</li> <li>– Various heterogeneous data such as weather, environment data, traffic volume data, etc. can be combined and used as element technology to develop into big data and machine learning based intelligent facility maintenance</li> <li>○ Benefit</li> </ul> <p>The construction of the sensor network at a low cost enables expansion of the monitoring target, it can be changed from time based maintenance, which is low efficiency, to condition driven maintenance, and safety improvement of old facilities And reducing social and economic costs can be expected.</p> <p>In addition, the global SOC facility maintenance market is expected to grow to an annual average growth rate of 24.7% by 2020 and to a \$ 3.4 billion market.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Keywords</b>               | <div>Big Data</div> <div>Sensor Network</div> <div>BMS</div> <div>LPWA</div> <div>LoRa</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

## < Contents >

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Abstract of the Research and Development Project .....          | 1   |
| 2. Current Technology Development of Korea and Other Nations ..... | 17  |
| 3. R&D Activities and Achievements .....                           | 26  |
| 4. Goal Achievements and Contribution to related Areas .....       | 102 |
| 5. Plans to Utilize Achievements .....                             | 110 |
| 6. Information on Science and Technology of Other Nations .....    | 115 |
| 7. Security level of R&D performance .....                         | 117 |
| 8. List of R&D Facilities and Device registerd in NTIS .....       | 117 |
| 9. Safety and Security Fulfillment .....                           | 117 |
| 10. Main Performances of R&D Projects .....                        | 118 |
| 11. Others .....                                                   | 118 |
| 12. List of References .....                                       | 119 |

## < 목 차 >

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 1. 연구개발과제의 개요 .....                       | 1   |
| 2. 국내외 기술 개발 현황 .....                     | 17  |
| 3. 연구수행내용 및 성과 .....                      | 26  |
| 4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....               | 102 |
| 5. 연구개발성과의 활용 계획 .....                    | 110 |
| 6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 .....           | 115 |
| 7. 연구개발성과의 보안등급 .....                     | 117 |
| 8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 .....    | 117 |
| 9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ..... | 117 |
| 10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 .....               | 118 |
| 11. 기타 사항 .....                           | 118 |
| 12. 참고 문헌 .....                           | 119 |

# 제1장. 연구개발과제의 개요

## 1. 연구개발 목적

### 가. 연구개발 배경

#### (1) 연구개발과제의 설명

- ① 국내 다양한 사회 인프라 기반시설 중에 하나인 교량은 광역 교통망 구현을 위해 전국에 3만천여개의 많은 교량이 설치되었으나, 장기간 운용에 따른 시설물 노후화로 유지관리 대상 및 비용이 증가되고 있음.
- ② 국내에 주로 사용되는 유선기반 교량 계측 시스템은 센서뿐만 아니라 추가적인 데이터로거, 채널확장기 등의 자동화 연동설비가 요구되어 고가의 초기 설치비 및 장기간 운용으로 많은 유지관리 비용이 발생됨.
- ③ 교량 유선계측 모니터링 시스템의 경제성 확보의 어려움으로 주요 특수교 위주로 설치 운영되고 있고, 이러한 문제를 해결하기 위해 근거리 무선 통신 기반센서네트워크 (Imote2 등)를 통한 노후교량 유지관리 구현을 목적으로 다양한 연구개발을 하고 있으나 아직까지 실용화 단계까지 접근하지 못한 상황임.
- ④ 저비용(제작, 설치, 운용), 고효율(장거리 송수신) 유지관리 시스템을 구현하기 위해서는 무선 네트워크 유지관리 시스템이 필수적이며 실시간 모니터링으로 발생된 많은 데이터의 처리, 가공, 보관, 추출 등의 Big Data 플랫폼을 기반으로 운영되어야 함.
- ⑤ 따라서 국외 선진국(미국, 유럽 등)에서 활발하게 적용되고 있는 LPWAN (Low Power Wide Area Network) 기술 중에 하나인 LoRa 통신기반을 활용하여 국내 ISM대역 통신규약에 만족할 수 있는 국산화된 스마트 센서노드 개발과 대용량 계측 데이터 처리를 위한 Big Data 통합관리 시스템 개발을 목적으로 함.
- ⑥ 본 연구에 대한 기존 유선계측 및 무선통신모듈에 대한 차별화 개발방안을 표 1.1과 같이 제시함.

<표 1.1> 연구과제 개발목표

| 기존 연구과제 성과물           |                                                       | 본 연구과제 개발 방안 |                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 계측 장비 및 통신 모듈 방식      | 유선계측장비 국산화 (유선계측장비 및 무선계측장비)                          | ⇒            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 개발된 유선계측장비를 무선계측장비로 활용을 위한 DAQ(Data Acquisition) 및 분산처리 가능한 무선 스마트 센서노드 개발을 목표로 함.</li> <li>- 기존 무선계측장비를 LoRa LPWAN 통신망 연동이 가능하고, 계측된 방대한 Data의 체계적인 DB수집이 가능한 LoRa 기반 스마트센서노드 개발.</li> </ul> |
|                       | 통신모듈방식 개발 (Imote2 / Bluetooth / Zigbee 방식 등)          | ⇒            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 근거리 무선통신 방식(200m이내)을 LOS(Line of Sight) 환경에서 최대 10Km까지 장거리 무선통신이 가능한 시스템으로 개발을 목표로 함.</li> <li>- 다수의 교량 계측데이터를 통합관리가 가능한 LoRa LPWAN 기반 자가망 구축 기술개발.</li> </ul>                                |
| 교량유지 관리분야 Big Data 구축 | 국내 교량 분야 Big Data 플랫폼 개발사례 없음 (국외에서는 다양한 연구개발 및 성과도출) | ⇒            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다수의 계측기에서 발생된 방대한 계측 데이터를 Big Data 기반 플랫폼으로 구현하고 안전성 및 건전성 평가기법을 도출할 수 있는 연구 추진.</li> <li>- 국외 선진 유지관리 시스템과 동등한 기술수준을 달성하는 것을 목표로 함.</li> </ul>                                                  |

## 나. 연구개발 최종목표

### (1) 연구개발의 최종 목표

| 구분    | 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       | <p>지역 또는 지구단위별 노후 교량 시설물의 증가로 유지관리 모니터링으로 발생된 방대한 계측값의 효율적인 관리를 위해 Big Data기반 통합 유지관리 플랫폼을 구축하여 교량의 구조적인 안전성, 건전성 분석을 통한 사전/사후 유지관리 체계를 확립하고, 센서네트워크 구축 및 유지관리 측면에서 경제적인 사물인터넷 기반의 LoRa LPWAN 네트워크를 활용한 시스템 개발로 효율적인 모니터링을 통한 유지관리 분야에 새로운 BM(Business Model) 실현을 목적으로</p> <p>① 가속도계, 변위계, 응력계, 케이블 장력계 등의 LPWAN(Low Power Wide Area Network) 기반의 센서, 센서노드, DAQ 등으로 구성된 무선 계측 센서 개발</p> <p>② 시계열 데이터베이스 Influx DB기반 Big Data 분석을 위한 플랫폼 개발<br/>당초 제안 : 하둡(Hadoop)기반 Big Data 시스템 → 변경: Influx DB기반</p> <p>③ 무선 계측시스템의 센서 규격화, 관리기준, 설치/시공 가이드(안) 개발을 최종목표로 설정함.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 최종 목표 | <div><div><div><div><div>ST-Micro Accelerometer LIS344ALH</div><div>OP-Amp For temp. correction OPA4344</div><div>Temp. &amp; Hum. Sensor SHT15</div><div>Quickfilter ADC Q74A512 &amp; circuit</div><div>Low-noise Accelerometer SD1221 &amp; circuit</div><div>LDO &amp; circuit</div><div>Signal amplification &amp; shift circuit</div></div><div><div>LoRa trans.</div><div>Arduino DAQ</div><div>Interfaces RS-232 RS-485 Voltage Output</div><div>동속계</div><div>경사계</div><div>가속도계</div></div></div></div><p>&lt;그림 1.1&gt; 센서, 센서노드, DAQ 등으로 구성된 무선 계측센서 개발</p><div><div><div><div>big data</div><div>Split:1 Map:1 Reduce:1 Output:1</div><div>Split:2 Map:2 Reduce:2 Output:2</div><div>Split:3 Map:3 Reduce:3 Output:3</div><div>Split:4 Map:4 Reduce:4 Output:4</div><div>Split:5 Map:5 Reduce:5 Output:5</div><div>Split:6 Map:6 Reduce:6 Output:6</div><div>Split:7 Map:7 Reduce:7 Output:7</div><div>Split:8 Map:8 Reduce:8 Output:8</div><div>Split:9 Map:9 Reduce:9 Output:9</div><div>Split:10 Map:10 Reduce:10 Output:10</div><div>Split:11 Map:11 Reduce:11 Output:11</div><div>Split:12 Map:12 Reduce:12 Output:12</div><div>Split:13 Map:13 Reduce:13 Output:13</div><div>Split:14 Map:14 Reduce:14 Output:14</div><div>Split:15 Map:15 Reduce:15 Output:15</div><div>Split:16 Map:16 Reduce:16 Output:16</div><div>Split:17 Map:17 Reduce:17 Output:17</div><div>Split:18 Map:18 Reduce:18 Output:18</div><div>Split:19 Map:19 Reduce:19 Output:19</div><div>Split:20 Map:20 Reduce:20 Output:20</div><div>Split:21 Map:21 Reduce:21 Output:21</div><div>Split:22 Map:22 Reduce:22 Output:22</div><div>Split:23 Map:23 Reduce:23 Output:23</div><div>Split:24 Map:24 Reduce:24 Output:24</div><div>Split:25 Map:25 Reduce:25 Output:25</div><div>Split:26 Map:26 Reduce:26 Output:26</div><div>Split:27 Map:27 Reduce:27 Output:27</div><div>Split:28 Map:28 Reduce:28 Output:28</div><div>Split:29 Map:29 Reduce:29 Output:29</div><div>Split:30 Map:30 Reduce:30 Output:30</div><div>Split:31 Map:31 Reduce:31 Output:31</div><div>Split:32 Map:32 Reduce:32 Output:32</div><div>Split:33 Map:33 Reduce:33 Output:33</div><div>Split:34 Map:34 Reduce:34 Output:34</div><div>Split:35 Map:35 Reduce:35 Output:35</div><div>Split:36 Map:36 Reduce:36 Output:36</div><div>Split:37 Map:37 Reduce:37 Output:37</div><div>Split:38 Map:38 Reduce:38 Output:38</div><div>Split:39 Map:39 Reduce:39 Output:39</div><div>Split:40 Map:40 Reduce:40 Output:40</div><div>Split:41 Map:41 Reduce:41 Output:41</div><div>Split:42 Map:42 Reduce:42 Output:42</div><div>Split:43 Map:43 Reduce:43 Output:43</div><div>Split:44 Map:44 Reduce:44 Output:44</div><div>Split:45 Map:45 Reduce:45 Output:45</div><div>Split:46 Map:46 Reduce:46 Output:46</div><div>Split:47 Map:47 Reduce:47 Output:47</div><div>Split:48 Map:48 Reduce:48 Output:48</div><div>Split:49 Map:49 Reduce:49 Output:49</div><div>Split:50 Map:50 Reduce:50 Output:50</div><div>Split:51 Map:51 Reduce:51 Output:51</div><div>Split:52 Map:52 Reduce:52 Output:52</div><div>Split:53 Map:53 Reduce:53 Output:53</div><div>Split:54 Map:54 Reduce:54 Output:54</div><div>Split:55 Map:55 Reduce:55 Output:55</div><div>Split:56 Map:56 Reduce:56 Output:56</div><div>Split:57 Map:57 Reduce:57 Output:57</div><div>Split:58 Map:58 Reduce:58 Output:58</div><div>Split:59 Map:59 Reduce:59 Output:59</div><div>Split:60 Map:60 Reduce:60 Output:60</div><div>Split:61 Map:61 Reduce:61 Output:61</div><div>Split:62 Map:62 Reduce:62 Output:62</div><div>Split:63 Map:63 Reduce:63 Output:63</div><div>Split:64 Map:64 Reduce:64 Output:64</div><div>Split:65 Map:65 Reduce:65 Output:65</div><div>Split:66 Map:66 Reduce:66 Output:66</div><div>Split:67 Map:67 Reduce:67 Output:67</div><div>Split:68 Map:68 Reduce:68 Output:68</div><div>Split:69 Map:69 Reduce:69 Output:69</div><div>Split:70 Map:70 Reduce:70 Output:70</div><div>Split:71 Map:71 Reduce:71 Output:71</div><div>Split:72 Map:72 Reduce:72 Output:72</div><div>Split:73 Map:73 Reduce:73 Output:73</div><div>Split:74 Map:74 Reduce:74 Output:74</div><div>Split:75 Map:75 Reduce:75 Output:75</div><div>Split:76 Map:76 Reduce:76 Output:76</div><div>Split:77 Map:77 Reduce:77 Output:77</div><div>Split:78 Map:78 Reduce:78 Output:78</div><div>Split:79 Map:79 Reduce:79 Output:79</div><div>Split:80 Map:80 Reduce:80 Output:80</div><div>Split:81 Map:81 Reduce:81 Output:81</div><div>Split:82 Map:82 Reduce:82 Output:82</div><div>Split:83 Map:83 Reduce:83 Output:83</div><div>Split:84 Map:84 Reduce:84 Output:84</div><div>Split:85 Map:85 Reduce:85 Output:85</div><div>Split:86 Map:86 Reduce:86 Output:86</div><div>Split:87 Map:87 Reduce:87 Output:87</div><div>Split:88 Map:88 Reduce:88 Output:88</div><div>Split:89 Map:89 Reduce:89 Output:89</div><div>Split:90 Map:90 Reduce:90 Output:90</div><div>Split:91 Map:91 Reduce:91 Output:91</div><div>Split:92 Map:92 Reduce:92 Output:92</div><div>Split:93 Map:93 Reduce:93 Output:93</div><div>Split:94 Map:94 Reduce:94 Output:94</div><div>Split:95 Map:95 Reduce:95 Output:95</div><div>Split:96 Map:96 Reduce:96 Output:96</div><div>Split:97 Map:97 Reduce:97 Output:97</div><div>Split:98 Map:98 Reduce:98 Output:98</div><div>Split:99 Map:99 Reduce:99 Output:99</div><div>Split:100 Map:100 Reduce:100 Output:100</div><div>Split:101 Map:101 Reduce:101 Output:101</div><div>Split:102 Map:102 Reduce:102 Output:102</div><div>Split:103 Map:103 Reduce:103 Output:103</div><div>Split:104 Map:104 Reduce:104 Output:104</div><div>Split:105 Map:105 Reduce:105 Output:105</div><div>Split:106 Map:106 Reduce:106 Output:106</div><div>Split:107 Map:107 Reduce:107 Output:107</div><div>Split:108 Map:108 Reduce:108 Output:108</div><div>Split:109 Map:109 Reduce:109 Output:109</div><div>Split:110 Map:110 Reduce:110 Output:110</div><div>Split:111 Map:111 Reduce:111 Output:111</div><div>Split:112 Map:112 Reduce:112 Output:112</div><div>Split:113 Map:113 Reduce:113 Output:113</div><div>Split:114 Map:114 Reduce:114 Output:114</div><div>Split:115 Map:115 Reduce:115 Output:115</div><div>Split:116 Map:116 Reduce:116 Output:116</div><div>Split:117 Map:117 Reduce:117 Output:117</div><div>Split:118 Map:118 Reduce:118 Output:118</div><div>Split:119 Map:119 Reduce:119 Output:119</div><div>Split:120 Map:120 Reduce:120 Output:120</div><div>Split:121 Map:121 Reduce:121 Output:121</div><div>Split:122 Map:122 Reduce:122 Output:122</div><div>Split:123 Map:123 Reduce:123 Output:123</div><div>Split:124 Map:124 Reduce:124 Output:124</div><div>Split:125 Map:125 Reduce:125 Output:125</div><div>Split:126 Map:126 Reduce:126 Output:126</div><div>Split:127 Map:127 Reduce:127 Output:127</div><div>Split:128 Map:128 Reduce:128 Output:128</div><div>Split:129 Map:129 Reduce:129 Output:129</div><div>Split:130 Map:130 Reduce:130 Output:130</div><div>Split:131 Map:131 Reduce:131 Output:131</div><div>Split:132 Map:132 Reduce:132 Output:132</div><div>Split:133 Map:133 Reduce:133 Output:133</div><div>Split:134 Map:134 Reduce:134 Output:134</div><div>Split:135 Map:135 Reduce:135 Output:135</div><div>Split:136 Map:136 Reduce:136 Output:136</div><div>Split:137 Map:137 Reduce:137 Output:137</div><div>Split:138 Map:138 Reduce:138 Output:138</div><div>Split:139 Map:139 Reduce:139 Output:139</div><div>Split:140 Map:140 Reduce:140 Output:140</div><div>Split:141 Map:141 Reduce:141 Output:141</div><div>Split:142 Map:142 Reduce:142 Output:142</div><div>Split:143 Map:143 Reduce:143 Output:143</div><div>Split:144 Map:144 Reduce:144 Output:144</div><div>Split:145 Map:145 Reduce:145 Output:145</div><div>Split:146 Map:146 Reduce:146 Output:146</div><div>Split:147 Map:147 Reduce:147 Output:147</div><div>Split:148 Map:148 Reduce:148 Output:148</div><div>Split:149 Map:149 Reduce:149 Output:149</div><div>Split:150 Map:150 Reduce:150 Output:150</div><div>Split:151 Map:151 Reduce:151 Output:151</div><div>Split:152 Map:152 Reduce:152 Output:152</div><div>Split:153 Map:153 Reduce:153 Output:153</div><div>Split:154 Map:154 Reduce:154 Output:154</div><div>Split:155 Map:155 Reduce:155 Output:155</div><div>Split:156 Map:156 Reduce:156 Output:156</div><div>Split:157 Map:157 Reduce:157 Output:157</div><div>Split:158 Map:158 Reduce:158 Output:158</div><div>Split:159 Map:159 Reduce:159 Output:159</div><div>Split:160 Map:160 Reduce:160 Output:160</div><div>Split:161 Map:161 Reduce:161 Output:161</div><div>Split:162 Map:162 Reduce:162 Output:162</div><div>Split:163 Map:163 Reduce:163 Output:163</div><div>Split:164 Map:164 Reduce:164 Output:164</div><div>Split:165 Map:165 Reduce:165 Output:165</div><div>Split:166 Map:166 Reduce:166 Output:166</div><div>Split:167 Map:167 Reduce:167 Output:167</div><div>Split:168 Map:168 Reduce:168 Output:168</div><div>Split:169 Map:169 Reduce:169 Output:169</div><div>Split:170 Map:170 Reduce:170 Output:170</div><div>Split:171 Map:171 Reduce:171 Output:171</div><div>Split:172 Map:172 Reduce:172 Output:172</div><div>Split:173 Map:173 Reduce:173 Output:173</div><div>Split:174 Map:174 Reduce:174 Output:174</div><div>Split:175 Map:175 Reduce:175 Output:175</div><div>Split:176 Map:176 Reduce:176 Output:176</div><div>Split:177 Map:177 Reduce:177 Output:177</div><div>Split:178 Map:178 Reduce:178 Output:178</div><div>Split:179 Map:179 Reduce:179 Output:179</div><div>Split:180 Map:180 Reduce:180 Output:180</div><div>Split:181 Map:181 Reduce:181 Output:181</div><div>Split:182 Map:182 Reduce:182 Output:182</div><div>Split:183 Map:183 Reduce:183 Output:183</div><div>Split:184 Map:184 Reduce:184 Output:184</div><div>Split:185 Map:185 Reduce:185 Output:185</div><div>Split:186 Map:186 Reduce:186 Output:186</div><div>Split:187 Map:187 Reduce:187 Output:187</div><div>Split:188 Map:188 Reduce:188 Output:188</div><div>Split:189 Map:189 Reduce:189 Output:189</div><div>Split:190 Map:190 Reduce:190 Output:190</div><div>Split:191 Map:191 Reduce:191 Output:191</div><div>Split:192 Map:192 Reduce:192 Output:192</div><div>Split:193 Map:193 Reduce:193 Output:193</div><div>Split:194 Map:194 Reduce:194 Output:194</div><div>Split:195 Map:195 Reduce:195 Output:195</div><div>Split:196 Map:196 Reduce:196 Output:196</div><div>Split:197 Map:197 Reduce:197 Output:197</div><div>Split:198 Map:198 Reduce:198 Output:198</div><div>Split:199 Map:199 Reduce:199 Output:199</div><div>Split:200 Map:200 Reduce:200 Output:200</div><div>Split:201 Map:201 Reduce:201 Output:201</div><div>Split:202 Map:202 Reduce:202 Output:202</div><div>Split:203 Map:203 Reduce:203 Output:203</div><div>Split:204 Map:204 Reduce:204 Output:204</div><div>Split:205 Map:205 Reduce:205 Output:205</div><div>Split:206 Map:206 Reduce:206 Output:206</div><div>Split:207 Map:207 Reduce:207 Output:207</div><div>Split:208 Map:208 Reduce:208 Output:208</div><div>Split:209 Map:209 Reduce:209 Output:209</div><div>Split:210 Map:210 Reduce:210 Output:210</div><div>Split:211 Map:211 Reduce:211 Output:211</div><div>Split:212 Map:212 Reduce:212 Output:212</div><div>Split:213 Map:213 Reduce:213 Output:213</div><div>Split:214 Map:214 Reduce:214 Output:214</div><div>Split:215 Map:215 Reduce:215 Output:215</div><div>Split:216 Map:216 Reduce:216 Output:216</div><div>Split:217 Map:217 Reduce:217 Output:217</div><div>Split:218 Map:218 Reduce:218 Output:218</div><div>Split:219 Map:219 Reduce:219 Output:219</div><div>Split:220 Map:220 Reduce:220 Output:220</div><div>Split:221 Map:221 Reduce:221 Output:221</div><div>Split:222 Map:222 Reduce:222 Output:222</div><div>Split:223 Map:223 Reduce:223 Output:223</div><div>Split:224 Map:224 Reduce:224 Output:224</div><div>Split:225 Map:225 Reduce:225 Output:225</div><div>Split:226 Map:226 Reduce:226 Output:226</div><div>Split:227 Map:227 Reduce:227 Output:227</div><div>Split:228 Map:228 Reduce:228 Output:228</div><div>Split:229 Map:229 Reduce:229 Output:229</div><div>Split:230 Map:230 Reduce:230 Output:230</div><div>Split:231 Map:231 Reduce:231 Output:231</div><div>Split:232 Map:232 Reduce:232 Output:232</div><div>Split:233 Map:233 Reduce:233 Output:233</div><div>Split:234 Map:234 Reduce:234 Output:234</div><div>Split:235 Map:235 Reduce:235 Output:235</div><div>Split:236 Map:236 Reduce:236 Output:236</div><div>Split:237 Map:237 Reduce:237 Output:237</div><div>Split:238 Map:238 Reduce:238 Output:238</div><div>Split:239 Map:239 Reduce:239 Output:239</div><div>Split:240 Map:240 Reduce:240 Output:240</div><div>Split:241 Map:241 Reduce:241 Output:241</div><div>Split:242 Map:242 Reduce:242 Output:242</div><div>Split:243 Map:243 Reduce:243 Output:243</div><div>Split:244 Map:244 Reduce:244 Output:244</div><div>Split:245 Map:245 Reduce:245 Output:245</div><div>Split:246 Map:246 Reduce:246 Output:246</div><div>Split:247 Map:247 Reduce:247 Output:247</div><div>Split:248 Map:248 Reduce:248 Output:248</div><div>Split:249 Map:249 Reduce:249 Output:249</div><div>Split:250 Map:250 Reduce:250 Output:250</div><div>Split:251 Map:251 Reduce:251 Output:251</div><div>Split:252 Map:252 Reduce:252 Output:252</div><div>Split:253 Map:253 Reduce:253 Output:253</div><div>Split:254 Map:254 Reduce:254 Output:254</div><div>Split:255 Map:255 Reduce:255 Output:255</div><div>Split:256 Map:256 Reduce:256 Output:256</div><div>Split:257 Map:257 Reduce:257 Output:257</div><div>Split:258 Map:258 Reduce:258 Output:258</div><div>Split:259 Map:259 Reduce:259 Output:259</div><div>Split:260 Map:260 Reduce:260 Output:260</div><div>Split:261 Map:261 Reduce:261 Output:261</div><div>Split:262 Map:262 Reduce:262 Output:262</div><div>Split:263 Map:263 Reduce:263 Output:263</div><div>Split:264 Map:264 Reduce:264 Output:264</div><div>Split:265 Map:265 Reduce:265 Output:265</div><div>Split:266 Map:266 Reduce:266 Output:266</div><div>Split:267 Map:267 Reduce:267 Output:267</div><div>Split:268 Map:268 Reduce:268 Output:268</div><div>Split:269 Map:269 Reduce:269 Output:269</div><div>Split:270 Map:270 Reduce:270 Output:270</div><div>Split:271 Map:271 Reduce:271 Output:271</div><div>Split:272 Map:272 Reduce:272 Output:272</div><div>Split:273 Map:273 Reduce:273 Output:273</div><div>Split:274 Map:274 Reduce:274 Output:274</div><div>Split:275 Map:275 Reduce:275 Output:275</div><div>Split:276 Map:276 Reduce:276 Output:276</div><div>Split:277 Map:277 Reduce:277 Output:277</div><div>Split:278 Map:278 Reduce:278 Output:278</div><div>Split:279 Map:279 Reduce:279 Output:279</div><div>Split:280 Map:280 Reduce:280 Output:280</div><div>Split:281 Map:281 Reduce:281 Output:281</div><div>Split:282 Map:282 Reduce:282 Output:282</div><div>Split:283 Map:283 Reduce:283 Output:283</div><div>Split:284 Map:284 Reduce:284 Output:284</div><div>Split:285 Map:285 Reduce:285 Output:285</div><div>Split:286 Map:286 Reduce:286 Output:286</div><div>Split:287 Map:287 Reduce:287 Output:287</div><div>Split:288 Map:288 Reduce:288 Output:288</div><div>Split:289 Map:289 Reduce:289 Output:289</div><div>Split:290 Map:290 Reduce:290 Output:290</div><div>Split:291 Map:291 Reduce:291 Output:291</div><div>Split:292 Map:292 Reduce:292 Output:292</div><div>Split:293 Map:293 Reduce:293 Output:293</div><div>Split:294 Map:294 Reduce:294 Output:294</div><div>Split:295 Map:295 Reduce:295 Output:295</div><div>Split:296 Map:296 Reduce:296 Output:296</div><div>Split:297 Map:297 Reduce:297 Output:297</div><div>Split:298 Map:298 Reduce:298 Output:298</div><div>Split:299 Map:299 Reduce:299 Output:299</div><div>Split:300 Map:300 Reduce:300 Output:300</div><div>Split:301 Map:301 Reduce:301 Output:301</div><div>Split:302 Map:302 Reduce:302 Output:302</div><div>Split:303 Map:303 Reduce:303 Output:303</div><div>Split:304 Map:304 Reduce:304 Output:304</div><div>Split:305 Map:305 Reduce:305 Output:305</div><div>Split:306 Map:306 Reduce:306 Output:306</div><div>Split:307 Map:307 Reduce:307 Output:307</div><div>Split:308 Map:308 Reduce:308 Output:308</div><div>Split:309 Map:309 Reduce:309 Output:309</div><div>Split:310 Map:310 Reduce:310 Output:310</div><div>Split:311 Map:311 Reduce:311 Output:311</div><div>Split:312 Map:312 Reduce:312 Output:312</div><div>Split:313 Map:313 Reduce:313 Output:313</div><div>Split:314 Map:314 Reduce:314 Output:314</div><div>Split:315 Map:315 Reduce:315 Output:315</div><div>Split:316 Map:316 Reduce:316 Output:316</div><div>Split:317 Map:317 Reduce:317 Output:317</div><div>Split:318 Map:318 Reduce:318 Output:318</div><div>Split:319 Map:319 Reduce:319 Output:319</div><div>Split:320 Map:320 Reduce:320 Output:320</div><div>Split:321 Map:321 Reduce:321 Output:321</div><div>Split:322 Map:322 Reduce:322 Output:322</div><div>Split:323 Map:323 Reduce:323 Output:323</div><div>Split:324 Map:324 Reduce:324 Output:324</div><div>Split:325 Map:325 Reduce:325 Output:325</div><div>Split:326 Map:326 Reduce:326 Output:326</div><div>Split:327 Map:327 Reduce:327 Output:327</div><div>Split:328 Map:328 Reduce:328 Output:328</div><div>Split:329 Map:329 Reduce:329 Output:329</div><div>Split:330 Map:330 Reduce:330 Output:330</div><div>Split:331 Map:331 Reduce:331 Output:331</div><div>Split:332 Map:332 Reduce:332 Output:332</div><div>Split:333 Map:333 Reduce:333 Output:333</div><div>Split:334 Map:334 Reduce:334 Output:334</div><div>Split:335 Map:335 Reduce:335 Output:335</div><div>Split:336 Map:336 Reduce:336 Output:336</div><div>Split:337 Map:337 Reduce:337 Output:337</div><div>Split:338 Map:338 Reduce:338 Output:338</div><div>Split:339 Map:339 Reduce:339 Output:339</div><div>Split:340 Map:340 Reduce:340 Output:340</div><div>Split:341 Map:341 Reduce:341 Output:341</div><div>Split:342 Map:342 Reduce:342 Output:342</div><div>Split:343 Map:343 Reduce:343 Output:343</div><div>Split:344 Map:344 Reduce:344 Output:344</div><div>Split:345 Map:345 Reduce:345 Output:345</div><div>Split:346 Map:346 Reduce:346 Output:346</div><div>Split:347 Map:347 Reduce:347 Output:347</div><div>Split:348 Map:348 Reduce:348 Output:348</div><div>Split:349 Map:349 Reduce:349 Output:349</div><div>Split:350 Map:350 Reduce:350 Output:350</div><div>Split:351 Map:351 Reduce:351 Output:351</div><div>Split:352 Map:352 Reduce:352 Output:352</div><div>Split:353 Map:353 Reduce:353 Output:353</div><div>Split:354 Map:354 Reduce:354 Output:354</div><div>Split:355 Map:355 Reduce:355 Output:355</div><div>Split:356 Map:356 Reduce:356 Output:356</div><div>Split:357 Map:357 Reduce:357 Output:357</div><div>Split:358 Map:358 Reduce:358 Output:358</div><div>Split:359 Map:359 Reduce:359 Output:359</div><div>Split:360 Map:360 Reduce:360 Output:360</div><div>Split:361 Map:361 Reduce:361 Output:361</div><div>Split:362 Map:362 Reduce:362 Output:362</div><div>Split:363 Map:363 Reduce:363 Output:363</div><div>Split:364 Map:364 Reduce:364 Output:364</div><div>Split:365 Map:365 Reduce:365 Output:365</div><div>Split:366 Map:366 Reduce:366 Output:366</div><div>Split:367 Map:367 Reduce:367 Output:367</div><div>Split:368 Map:368 Reduce:368 Output:368</div><div>Split:369 Map:369 Reduce:369 Output:369</div><div>Split:370 Map:370 Reduce:370 Output:370</div><div>Split:371 Map:371 Reduce:371 Output:371</div><div>Split:372 Map:372 Reduce:372 Output:372</div><div>Split:373 Map:373 Reduce:373 Output:373</div><div>Split:374 Map:374 Reduce:374 Output:374</div><div>Split:375 Map:375 Reduce:375 Output:375</div><div>Split:376 Map:376 Reduce:376 Output:376</div><div>Split:377 Map:377 Reduce:377 Output:377</div><div>Split:378 Map:378 Reduce:378 Output:378</div><div>Split:379 Map:379 Reduce:379 Output:379</div><div>Split:380 Map:380 Reduce:380 Output:380</div><div>Split:381 Map:381 Reduce:381 Output:381</div><div>Split:382 Map:382 Reduce:382 Output:382</div><div>Split:383 Map:383 Reduce:383 Output:383</div><div>Split:384 Map:384 Reduce:384 Output:384</div><div>Split:385 Map:385 Reduce:385 Output:385</div><div>Split:386 Map:386 Reduce:386 Output:386</div><div>Split:387 Map:387 Reduce:387 Output:387</div><div>Split:388 Map:388 Reduce:388 Output:388</div><div>Split:389 Map:389 Reduce:389 Output:389</div><div>Split:390 Map:390 Reduce:390 Output:390</div><div>Split:391 Map:391 Reduce:391 Output:391</div><div>Split:392 Map:392 Reduce:392 Output:392</div><div>Split:393 Map:393 Reduce:393 Output:393</div><div>Split:394 Map:394 Reduce:394 Output:394</div><div>Split:395 Map:395 Reduce:395 Output:395</div><div>Split:396 Map:396 Reduce:396 Output:396</div><div>Split:397 Map:397 Reduce:397 Output:397</div><div>Split:398 Map:398 Reduce:398 Output:398</div><div>Split:399 Map:399 Reduce:399 Output:399</div><div>Split:400 Map:400 Reduce:400 Output:400</div><div>Split:401 Map:401 Reduce:401 Output:401</div><div>Split:402 Map:402 Reduce:402 Output:402</div><div>Split:403 Map:403 Reduce:403 Output:403</div><div>Split:404 Map:404 Reduce:404 Output:404</div><div>Split:405 Map:405 Reduce:405 Output:405</div><div>Split:406 Map:406 Reduce:406 Output:406</div><div>Split:407 Map:407 Reduce:407 Output:407</div><div>Split:408 Map:408 Reduce:408 Output:408</div><div>Split:409 Map:409 Reduce:409 Output:409</div><div>Split:410 Map:410 Reduce:410 Output:410</div><div>Split:411 Map:411 Reduce:411 Output:411</div><div>Split:412 Map:412 Reduce:412 Output:412</div><div>Split:413 Map:413 Reduce:413 Output:413</div><div>Split:414 Map:414 Reduce:414 Output:414</div><div>Split:415 Map:415 Reduce:415 Output:415</div><div>Split:416 Map:416 Reduce:416 Output:416</div><div>Split:417 Map:417 Reduce:417 Output:417</div><div>Split:418 Map:418 Reduce:418 Output:418</div><div>Split:419 Map:419 Reduce:419 Output:419</div><div>Split:420 Map:420 Reduce:420 Output:420</div><div>Split:421 Map:421 Reduce:421 Output:421</div><div>Split:422 Map:422 Reduce:422 Output:422</div><div>Split:423 Map:423 Reduce:423 Output:423</div><div>Split:424 Map:424 Reduce:424 Output:424</div><div>Split:425 Map:425 Reduce:425 Output:425</div><div>Split:426 Map:426 Reduce:426 Output:426</div><div>Split:427 Map:427 Reduce:427 Output:427</div><div>Split:428 Map:428 Reduce:428 Output:428</div><div>Split:429 Map:429 Reduce:429 Output:429</div><div>Split:430 Map:430 Reduce:430 Output:430</div><div>Split:431 Map:431 Reduce:431 Output:431</div><div>Split:432 Map:432 Reduce:432 Output:432</div><div>Split:433 Map:433 Reduce:433 Output:433</div><div>Split:434 Map:434 Reduce:434 Output:434</div><div>Split:435 Map:435 Reduce:435 Output:435</div><div>Split:436 Map:436 Reduce:436 Output:436</div><div>Split:437 Map:437 Reduce:437 Output:437</div><div>Split:438 Map:438 Reduce:438 Output:438</div><div>Split:439 Map:439 Reduce:439 Output:439</div><div>Split:440 Map:440 Reduce:440 Output:440</div><div>Split:441 Map:441 Reduce:441 Output:441</div><div>Split:442 Map:442 Reduce:442 Output:442</div><div>Split:443 Map:443 Reduce:443 Output:443</div><div>Split:444 Map:444 Reduce:444 Output:444</div><div>Split:445 Map:445 Reduce:445 Output:445</div><div>Split:446 Map:446 Reduce:446 Output:446</div><div>Split:447 Map:447 Reduce:447 Output:447</div><div>Split:448 Map:448 Reduce:448 Output:448</div><div>Split:449 Map:449 Reduce:449 Output:449</div><div>Split:450 Map:450 Reduce:450 Output:450</div><div>Split:451 Map:451 Reduce:451 Output:451</div><div>Split:452 Map:452 Reduce:452 Output:452</div><div>Split:453 Map:453 Reduce:453 Output:453</div><div>Split:454 Map:454 Reduce:454 Output:454</div><div>Split:455 Map:455 Reduce:455 Output:455</div><div>Split:456 Map:456 Reduce:456 Output:456</div><div>Split:457 Map:457 Reduce:457 Output:457</div><div>Split:458 Map:458 Reduce:458 Output:458</div><div>Split:459 Map:459 Reduce:459 Output:459</div><div>Split:460 Map:460 Reduce:460 Output:460</div><div>Split:461 Map:461 Reduce:461 Output:461</div><div>Split:462 Map:462 Reduce:462 Output:462</div><div>Split:463 Map:463 Reduce:463 Output:463</div><div>Split:464 Map:464 Reduce:464 Output:464</div><div>Split:465 Map:465 Reduce:465 Output:465</div><div>Split:466 Map:466 Reduce:466 Output:466</div><div>Split:467 Map:467 Reduce:467 Output:467</div><div>Split:468 Map:468 Reduce:468 Output:468</div><div>Split:469 Map:469 Reduce:469 Output:469</div><div>Split:470 Map:470 Reduce:470 Output:470</div><div>Split:471 Map:471 Reduce:471 Output:471</div><div>Split:472 Map:472 Reduce:472 Output:472</div><div>Split:473 Map:473 Reduce:473 Output:473</div><div>Split:474 Map:474 Reduce:474 Output:474</div><div>Split:475 Map:475 Reduce:475 Output:475</div><div>Split:476 Map:476 Reduce:476 Output:476</div><div>Split:477 Map:477 Reduce:477 Output:477</div><div>Split:478 Map:478 Reduce:478 Output:478</div><div>Split:479 Map:479 Reduce:479 Output:479</div><div>Split:480 Map:480 Reduce:480 Output:480</div><div>Split:481 Map:481 Reduce:481 Output:481</div><div>Split:482 Map:482 Reduce:482 Output:482</div><div>Split:483 Map:483 Reduce:483 Output:483</div><div>Split:484 Map:484 Reduce:484 Output:484</div><div>Split:485 Map:485 Reduce:485 Output:485</div><div>Split:486 Map:486 Reduce:486 Output:486</div><div>Split:487 Map:487 Reduce:487 Output:487</div><div>Split:488 Map:488 Reduce:488 Output:488</div><div>Split:489 Map:489 Reduce:489 Output:489</div><div>Split:490 Map:490 Reduce:490 Output:490</div><div>Split:491 Map:491 Reduce:491 Output:491</div><div>Split:492</div></div></div></div></div> |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 세부 목표 | ① SHM-A 센서보드에 상응하는 가속도계, 온도계, 습도계를 포함한 Prototype 통합 디지털 센서 보드 개발<br>② 기존 상용 계측센서와 인터페이스 가능하며 LoRa LPWAN센서네트워크 구축이 가능한 DAQ 및 스마트 센서노드 개발<br>③ LoRa Class A/C 데이터 전송 구현<br>④ 대용량 계측데이터의 Big Data 처리를 위한 데이터베이스 설계<br>⑤ Big Data 플랫폼의 데이터 프로세싱을 위한 Influx DB기반 Platform 구축<br>⑥ 무선 계측 교량 유지 관리 시스템 Test Bed 적용 및 성능검증<br>⑦ Big Data DB자료 관리 및 모니터링 방안<br>⑧ 무선계측 센서 규격화 및 세부사항 표준화 방안 도출<br>⑨ 교량 무선계측시스템 운용에 필요한 데이터 모니터링용 관리기준 설정도출<br>⑩ 교량 무선계측시스템 시공(설치) 및 유지관리(운용) 가이드(안) 개발 |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## (2) 연차별 연구개발 목표 및 내용

### ① 1차 연도

#### ㉓ 개발 목표

##### [주관연구기관(동일기술공사)]

- 교량 무선 자동 계측 유지관리 모니터링을 위한 국내외 기술조사
- 3축가속도계, 온도계, GPS를 포함한 Prototype 통합 디지털 센서 보드설계 및 개발
- 기존 상용 계측기의 인터페이스 구축방안 연구
- 실내 Lab Test를 통한 LoRa Data 송수신 여부 검증연구
- LoRa 방식의 LPWAN 센서네트워크 플랫폼 개발방안 연구

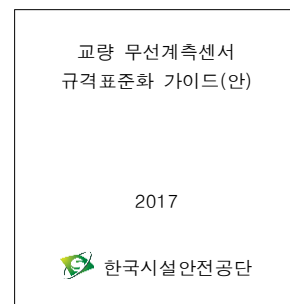
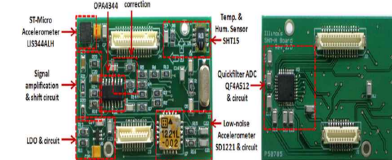
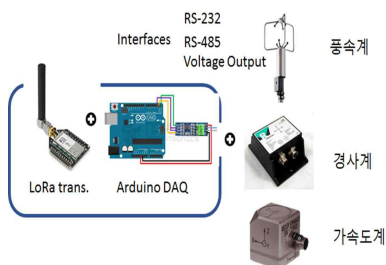
##### [공동연구기관(한국시설안전공단)]

- 교량 무선계측시스템에 적용되는 계측기기(센서포함)에 대한 규격(성능)에 대한 표준화 연구

##### [참여기관(신우디엔시)]

- 토목 교량분야 유지관리 국내외 기술조사

#### ㉔ 개발 내용 및 범위



(주관) 통합센서모듈 및 DAQ, LPWA 센서노드 개발

(공동) 계측센서 표준화 가이드(안) 개발

<그림 1.4> 1차연도 개발 내용 및 범위(주관/공동연구기관)

### [주관연구기관(동일기술공사)]

- 교량 유지관리 모니터링을 위한 해외 MEMS 기반 센서보드 분석
- 국내외 기술조사 (Big Data 및 교량구조물의 유지관리 현황 분석)
- 국내 교량형태별 적용방안 (PC, PSC, 케이블교 등) 기술조사
- 3축가속도계, 온도계, GPS를 포함한 Prototype 통합 디지털 센서 보드설계 및 개발
- 기존 교량 계측에 사용되는 가속도계의 대체가 가능한 MEMS 기반(가속도계, 온도계, 습도계 포함)하는 Prototype 통합 디지털 센서보드 제작(Raspberry Pi 기반)
- 센서 모듈 및 OP Amp, ADC(Analog to Digital Converter) 등의 소자가 DAQ와 연결을 위한 커넥터 구성과 계측 및 통신을 위한 펌웨어 개발
- 통합디지털 센서보드 계측데이터 수집 및 분석을 위한 DAQ 보드 및 기존 상용 계측기의 인터페이스 구축방안
- 기존 유선기반 센서네트워크에서 데이터 수집목적으로 적용하고 있는 데이터로거(정적, 동적)는 채널확장기가 포함되어 고가의 장비(1,000만원 상회)이며, 현재 운용되고 있는 유선 기반의 교량 계측 센서네트워크를 위한 많은 자동화 연동설비가 요구됨.
- 기존 유선기반 센서네트워크에서 LoRa LPWA 기반의 무선 센서네트워크로 전환을 위해 기존센서 I/O값들이 LoRa 무선통신 인터페이스가 가능한 DAQ 및 센서노드 개발 (LoRa LPWA 네트워크를 위한 데이터로거 구현)
- 실내 Lab Test를 통한 LoRa Data 송수신 여부 검증연구
- Plate Shaker를 통한 가속도 계측값에 대한 통합센서보드 기능 및 LoRa 송수신 구현 실험 및 검증
- LoRa 방식의 LPWAN 센서네트워크 플랫폼 개발방안
- 실용화 가능한 LoRa 센서노드 및 DAQ보드 개발방안 연구
- 최종성과물
- 가속도계, 온도계, 습도계를 포함한 MEMS기반 Prototype 통합 디지털 센서 보드

### [공동연구기관(한국시설안전공단)]

- 교량 무선계측기기(무선센서 등)에 대한 사양조사 및 분석
- 장기계측에 적합한 계측기기에 대한 표준사양 제안
- ※ 설정기준 : 유선 가속도센서와 개발된 무선 가속도센서의 민감도(sensitivity) 차이로 무선계측기기의 표준사양이 달라지는 것을 고려 사양 및 분석을 기준으로 함.
- 최종성과물
- 교량 무선계측센서 규격표준화 가이드(안) 1식

## ② 2차 연도

### ㉠ 개발 목표

### [주관연구기관(동일기술공사)]

- 교량 안전도 및 건전성 평가를 위한 LoRa LPWAN 무선계측 플랫폼 구축
- 교량 무선계측 센서 네트워크 및 미들웨어 개발
- LoRa Alliance 표준을 기반한 무선자동계측 플랫폼 구축
- 센서 네트워크 Pilot Test 성능 검증

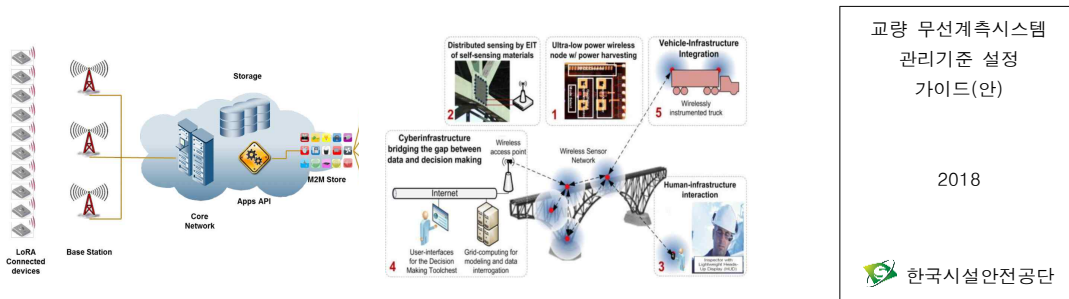
### [공동연구기관(한국시설안전공단)]

- 교량 무선계측시스템 운용에 필요한 데이터 모니터링용 관리기준 설정에 대한 연구
- 무선계측시스템 관리기준 설정방안 제안

## [참여기관(신우디엔시)]

- 시범설치 적용 교량 계획 및 구축방안

### ㉠ 개발 내용 및 범위



(주관) 교량 안전도 및 건전성 평가를 위한

LoRa LPWAN 무선계측 플랫폼 구축

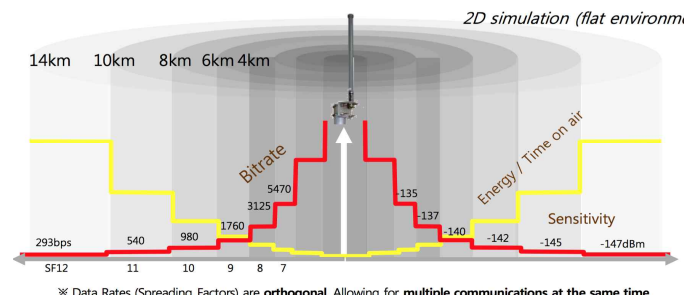
(공동) 교량무선계측시스템

관리기준

<그림 1.5> 2차연도 개발 내용 및 범위(주관/공동연구기관)

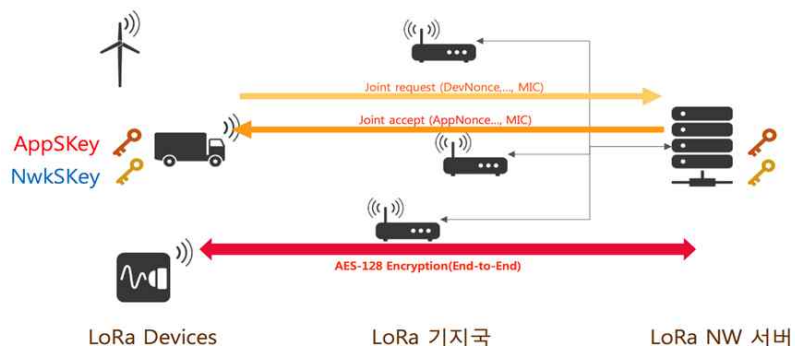
## [주관연구기관(동일기술공사)]

- 국내 LoRa Alliance 표준 구현으로 교량 무선계측 센서 네트워크 및 미들웨어 무선 자동계측 플랫폼 구축
- LoRa MAC 프로토콜 처리
- LBT(Listen Before Talk) 처리
- ADR(Adaptive Data Rate) 지원
- LoRa Network Server 구축 및 Web 기반 모니터링 시스템 구현 방안
- 계측 데이터베이스 구축 (Big Data 구축을 위한 사전 단계로 계측데이터 검증)



<그림 1.6> LoRa Alliance 표준의 커버리지

- SSL/AES를 통한 단말 및 네트워크 암호화 방안



<그림 1.7> LoRa 기반 네트워크 통신

- 센서 네트워크 Pilot Test 및 성능 평가
  - 사전 실내 실험을 통한 통합 디지털 센서 신뢰성 및 성능 평가
  - Pilot Test를 통한 LoRa 스마트 센서노드 성능 평가
  - Test Bed 교량 대상 선정 및 방안 연구
    - (기 구축된 유선 기반 센서네트워크와 비교 실험으로 신뢰성 및 성능 평가)
  - AP(Access Point)당 수용 Coverage Test를 통한 Scalability 확보
- 최종 성과물
  - 국내 LoRa Alliance 표준기반 및 Customization을 통한 LoRa 네트워크 및 미들웨어 무선자동계측 플랫폼 (RS-232, RS-485등 시리얼 통신 및 상용 풍속계, 경사계와 인터페이스 가능하고, LoRa Class A/C와 연동되는 DAQ 및 센서노드)

#### [공동연구기관(한국시설안전공단)]

- 교량 부재별 관리기준 적용 현황 조사
- 교량 무선계측시스템 적용을 위한 관리기준 설정절차 제안
  - ※ 설정기준 : 유선센서는 기본적으로 동적데이터에 대한 관리기준치가 주로 적용되는 반면, LoRa기반 스마트센서노드는 자체 신호처리를 통해 얻고자 하는 결과 (고유 진동수, 장력값 등)가 정적데이터로 전송하기 때문에 관리기준치 적용기준의 상이함을 고려한 관리기준치 설정을 기준으로 연구를 수행
- 최종성과물
  - 교량 무선계측시스템 관리기준 설정(안) 1식

### ③ 3차연도

#### ㉔ 개발 목표

#### [주관연구기관(동일기술공사)]

- 대용량 계측데이터 저장, 처리, 송신을 위한 Big Data 시스템 개발방안 연구
- Big Data 무선 계측 교량 유지 관리 시스템 구현 및 Test Bed를 통한 성능분석
- Big Data 기반 통합 교량관리 시스템 실용화방안 연구

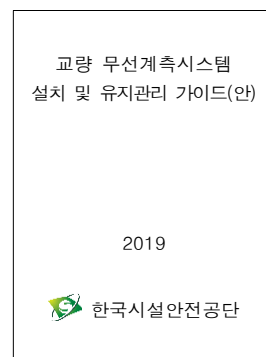
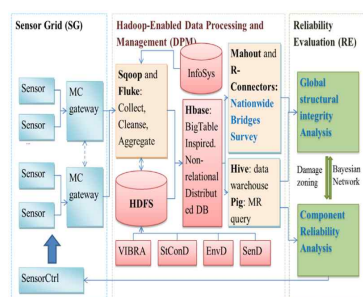
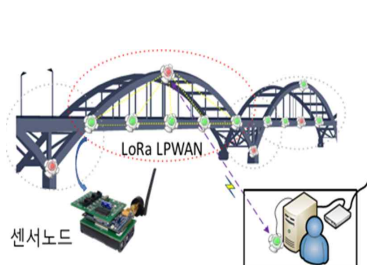
#### [공동연구기관(한국시설안전공단)]

- 교량 무선계측시스템 시공(설치) 및 유지관리(운용)에 대한 가이드(안) 개발

#### [참여기관(신우디엔시)]

- Test Bed 설치 및 시설물 유지관리

#### ㉕ 개발 내용 및 범위



(주관) 교량무선계측시스템 Test Bed 시스템 구축 및 (공동) 교량무선계측시스템  
분석을 통한 실용화 시공/유지관리 매뉴얼

<그림 1.8> 3차 연도 개발 내용 및 범위(주관/공동기관)

### [주관연구기관(동일기술공사)]

- 대용량 센서 계측데이터 Big Data 분석을 위한 국내외 선행기술 조사
- 대용량 교량 계측 데이터(시계열DATA)를 처리를 위한 Influx DB기반 플랫폼 구현
- Big Data 기반의 통합 교량 관리 시스템 Test Bed 구축
- Test Bed를 통한 Data 수집 및 분석 연구
- Test Bed를 통한 국내 교량 적용 및 운영 방안 연구
- 실용화 및 사업화를 위한 시스템 개선방안 연구
- 최종성과물
  - 시계열 데이터베이스 기반의 Big Data 교량 통합관리 시스템

### [공동연구기관 (한국시설안전공단)]

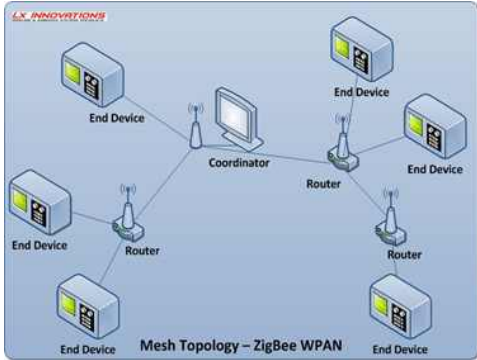
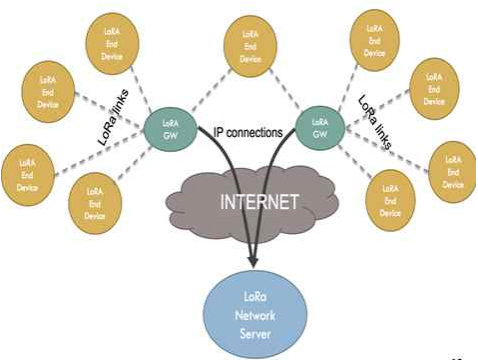
- 교량 무선계측시스템 시공(설치) 현황조사 및 분석
- 교량 무선계측시스템 유지관리(운용)에 대한 현황 조사 및 분석
  - ※ 설정기준 : 본 LoRa기반 센서노드는 무선 송수신 안테나를 사용하기 때문에 설치 단계부터 원활한 통신환경 유지가 요구되며, 유지관리 측면에서도 무선센서의 장기적인 내구성능이 유선센서와 상이하므로 이에 대한 무선계측시스템 시공 및 유지관리 가이드 안 제시를 목표로 연구를 설정함.
- 최종성과물
  - 교량 무선계측시스템 시공 및 유지관리 가이드(안) 1식

## (2) 연구개발의 창의성 · 혁신성 등

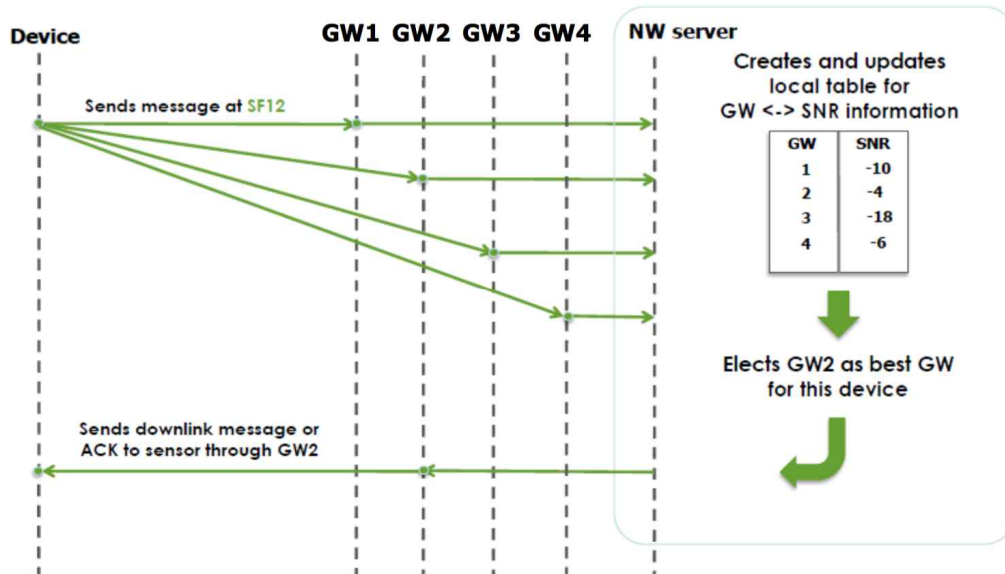
### ① 기술적인 측면 : 실용화 가능한 LPWAN기반 무선통신 구현

- 국내 노후 교량의 개수는 급속도로 증가되고 있으며 교량 형식별로 계측 항목 및 방식이 다르기 때문에, 비용절감을 위한 무선센서네트워크 구축 시 센서보드, DAQ 등이 현장 상황에 따라 Customization이 요구되며 접근성, 설치편의성, 통합관리, 비용절감, 커버리지(Coverage), 확장성(Scalability) 등이 고려되어야 함.
- SKT, KT, LGU+ 등 국내 통신사 중심으로 LPWAN 전국망을 구축하고 있으며, 지자체 관공서의 경우 G-IOT 구현을 목적으로 자가망을 설치할 추진하고 있음.
- 최근 대형 통신사들은 LoRa, LTE-m, NB-IoT 등의 기술을 기반으로 LPWAN 전국망 구축을 완료 또는 구축 중에 있으며, 지자체에서는 별도의 비용을 최소화하기 위해 자가망을 구축하여 경제적인 M2M(Machine to Machine) 센서 네트워크 구현을 목적으로 추진되고 있음.
- 최근 진도대교, 화명대교에 구축된 무선 계측 시스템은 미국 일리노이주립대학에서 개발된 센서보드(SHM-A, SHM-W 등)와 인텔이 개발한 센서노드(Imote2)를 적용하였으나, Zigbee 방식의 PAN(Personal Area Network)의 형태로 신호 도달거리가 최대 200m 수준(외부안테나를 이용할 경우)이며, 국외에서 개발된 제품으로 국내 상황과 조건에 따른 Customization이 어려움.
- 따라서 국외에 의존된 기술을 가지고 국내에 교량 무선 네트워크 유지관리 시스템에 적용하기에는 한계가 있어 기존 대비 기술적(신호도달거리, 전력소모 등)으로 우수하고 구축 및 유지관리면에서 경제적인 LPWAN 기반 무선 네트워크 유지관리 시스템을 개발하는 것이 목적이며 기존 유지관리 목적으로 적용된 무선통신 기술 대비 기술적인 차별성은 표 1.2와 같이 제시함.

<표 1.2> Zibee와 LPWA 무선계측방식 비교

| 구분                 | Zigbee                                                                                                                                       | LPWA                                                                                                                                                                                         |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 네트워크 구성            |  <p>네트워크 구성(mesh)<br/>⇒ 코디네이터, 라우터, 단말</p>                  |  <p>네트워크 구성(star topology)<br/>⇒ 게이트웨이, 서버, 단말</p>                                                         |
| 신호도달거리             | 10m~200m (외부안테나 사용 시)                                                                                                                        | LOS 환경: 10~15Km,<br>non-LOS 환경 : 2~5Km                                                                                                                                                       |
| 전력 소모              | 적음<br>(배터리 기반 동작 어려움)                                                                                                                        | 아주 적음<br>(배터리 기반 동작 가능)                                                                                                                                                                      |
| 대역폭<br>(Bandwidth) | 20kbps(868 MHz), 40kbps(915 MHz), 250kbps(2450 MHz)                                                                                          | 0.3~22kbps<br>(LoRa modulation),<br>100kbps(with GFSK)                                                                                                                                       |
| 장단점                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 짧은 신호 도달거리로 인해, 광역에서의 센서 네트워크 구축이 어려움</li> <li>- 다른 PAN 통신에 비해 저전력이긴 하지만, 배터리 기반 동작은 어려움</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 긴 신호도달거리와 Star Topology 형태의 네트워크 구성으로 광역(Wide Area)에서 M2M 센서네트워크 구축에 적합</li> <li>- 배터리 기반 동작 가능</li> <li>- PAN 에 비해 느린 속도 (0.3~100 kbps)</li> </ul> |

- 본 연구에서 제안한 LoRa LPWAN은 비면허 대역을 사용하는 통신 방식으로 네트워크 운영주체가 자가망 구축 시 별도의 무선 통신비용이 발생하지 않는 센서네트워크 구축이 가능하며, LOS(Line of Sight) 환경에서 통신 단말의 출력에 따라 최대 10Km, Non-LOS 환경에서는 최대 5Km 수준으로 넓은 커버리지를 갖는 센서네트워크를 구축 가능.
- LoRa LPWAN 사용대역은 소위 ISM(Industrial, Scientific and Medical) 비면허 통신 대역으로 주파수 대역의 상호 간섭을 용인하며 공동 사용을 전제로 하는 주파수대역이나, LoRa의 경우 게이트웨이가 최대 200mW의 출력을 갖는 소출력 통신이며, Co-Channel GMSK Rejection 등을 통하여 간섭의 최소화가 가능.
- LoRa 통신은 Co-Channel GMSK Rejection을 통하여 일반적인 노이즈, 간섭 신호의 Level인 19.5dB 이하로 수신할 수 있어 다양한 대역대가 함께 존재하는 네트워크 환경에 대한 간섭을 최소화할 수 있으며 Serving 기지국 없이 모든 기지국의 디바이스 신호를 수신하고 Core단에서 최적 수신 기지국을 선택하는 방식으로 핸드오버(Hand-over)가 필요 없음.



<그림 1.9> LoRa 멀티채널 다양성 처리

② 경제적인 측면 : 국내 운용중인 유선계측 시스템 대비 우수한 경제성 확보

- 기존 유선 계측 방식은 국내외(지자체 및 시설물 운영 주체)에서 현재까지 가장 널리 운용되는 시스템이며, 표 1.3과 같이 유선계측방식은 정적/동적 계측센서의 상시전원 연결과 유선 통신으로 요구되는 자동화 연동설비가 많아 초기 설치비가 고가이며, 많은 장비를 상시 운영함에 따른 많은 유지관리 비용이 발생.

<표 1.3> 유선/무선계측방식 비교

| 구분      | 기존 유선계측방식                                                                                                                                                                                                                                                                 | LoRa LPWAN 무선계측방식                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 시스템 개념도 |                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 장단점     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 유선연결, 상시전원으로 시스템 복잡도 및 설치 및 유지관리 비용 고가</li> <li>- 데이터 획득 및 수집을 위한 장치 및 별도 계측실 필요</li> <li>- 유선 연결로 인한 관리 비용 상승 및 유선 연결 장치의 물리적 손상 시 운용을 감소</li> <li>- 시스템 이전 설치 어려움</li> <li>- 자동 계측 시스템이 설계에 반영되지 않은 노후 시설물에 적용이 어려움</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정적, 동적 데이터 수집기, Serial Converter, Hub 등 집합적 자동 계측장치 불필요</li> <li>- 개별 무선통신 연결, 배터리 동작으로 시스템 단순화, 비용감소</li> <li>- 센서노드와 기지국간의 개별 무선 통신으로 계측 장애 요인 최소화 및 운용효율 향상</li> <li>- 비면허 대역 무선 자가망 구축이 가능하여, 구축과 유지관리 비용이 저렴한</li> <li>- 배터리 동작, 무선 연결로 인해 노후시설물 적용이 용이함</li> </ul> |

- 국내에서 운용되고 있는 유선계측 모니터링 시스템 적용사례를 기준으로 계측장비 및 설치비에 대하여 본 제안기술과의 사전 경제성 검토결과 약 48.9%의 비용절감효과가 가능하여 많은 노후교량에 적용할 수 있는 대안기술로 발전가능.

<표 1.4> 기존 유선시스템 1개소당 구축비용

| 구분        |                       | 단가      | 갯수 | 금액(천 원) |
|-----------|-----------------------|---------|----|---------|
| 계측<br>자재비 | 계측센서                  | 3,700   | 25 | 92,500  |
|           | 계측시스템<br>주변기기         | 244,905 | 1  | 244,905 |
| 설치비       | 센서설치                  | 13,900  | 1  | 13,900  |
|           | 자동계측 시스템 및<br>주변기기 설치 | 68,500  | 1  | 68,500  |
| 총 계       |                       |         |    | 419,805 |

<표 1.5> LPWAN 무선계측방식 1개소당 구축비용

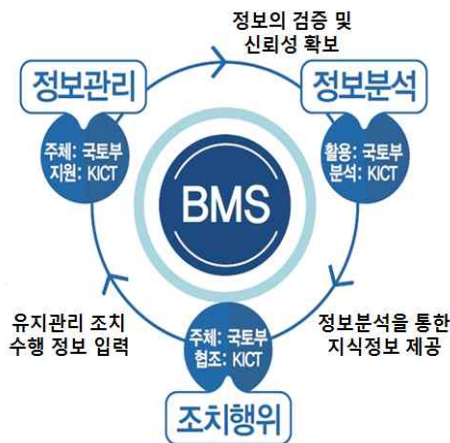
| 구분                          | 단가     | 갯수 | 금액(천 원)              |
|-----------------------------|--------|----|----------------------|
| 센서(센서+센서노드)                 | 3,000  | 25 | 75,000               |
| 기지국                         | 20,000 | 1  | 20,000               |
| 설치비                         | 50,000 | 1  | 50,000               |
| 계측서버(데이터센터내)                | 10,000 | 1  | 10,000               |
| 무선 센서네트워크 구축 및<br>관제 시스템 연동 | 50,000 | 1  | 50,000               |
| 총 계                         |        |    | 205,000<br>(48.9% ↓) |

## 2. 연구개발의 필요성

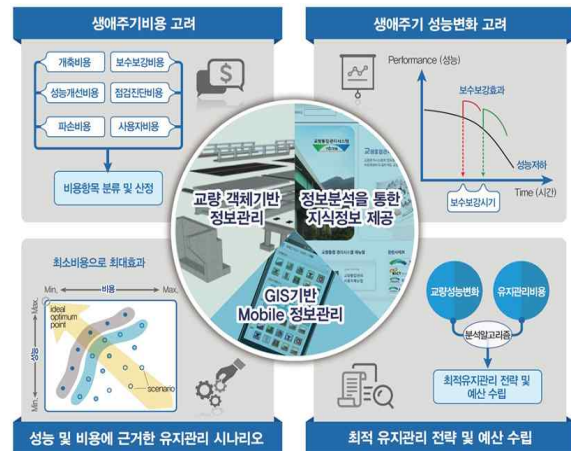
### 가. 기술적 측면

#### (1) 노후교량 유지관리 시스템(BMS)의 필요성 증대

- 국내에서는 노후교량에 대한 유지관리 대책으로 BMS(Bridge Management System)를 운영하고 있으며, 계측 데이터 저장, 정기적/특수적인 점검을 통한 교량의 상태 및 수명에 대한 예측, 보수·보강 방법의 결정, 교량 정보의 교환과 교통 소통의 편의를 향상시키기 위한 네트워크의 구축으로 전산화된 종합정보 시스템 운영이 이루어지고 있음
- BMS 적용 이전의 교량유지관리는 노후화 및 붕괴 방지를 위해 주기적인(5년) 정밀안전진단을 통하여 교량의 보수범위를 결정하고, 1등급 교량과 같은 중요도가 높은 시설물을 기준으로 유선기반 유지관리 모니터링을 하였으나, 2000년 후반부터 유/무선 교량 유지관리 시스템을 통하여 국내 중요 교량 시설물에 적용되어 BMS기반으로 운영되고 있음



<그림 1.10> BMS의 주요 목적



<그림 1.11> BMS의 주요 특징

#### (2) 효율적인 BMS 개선을 위한 개발 필요

- 한국의 지능형 시설물 안전 및 유지관리 기술수준은 표 1.6과 같이 최고 기술보유국 대비 74.1%에 불과(기술격차 6.8년)함.

<표 1.6> 시설물 안전 및 유지관리 분야 지능형 기술수준 비교

| 국가   | 미국     | EU    | 일본    | 한국    | 중국    | 세계 최고국<br>기술격차 |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|----------------|
| 기술수준 | 100.0% | 91.6% | 94.8% | 74.1% | 63.2% | 6.8년           |

※ 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획(2018-2022년)

- 현재 교량 등에 대한 자동 계측에 의한 유지 관리는 법령에 정해진 바는 없으며, 국토교통부, 지자체 등 시설물 관리 주체의 필요에 따라 신규 건설되는 교량(사장교, 현수교 등의 특수교 위주) 또는 일부 중요, 노후 시설물에 대해 유선 기반 자동 계측에 의한 교량 유지관리 모니터링이 이루어지고 있으나, 모니터링을 위한 센서네트워크 구축과 운영이 고비용이기 때문에 많은 교량을 적용하기에는 경제적인 한계가 발생.

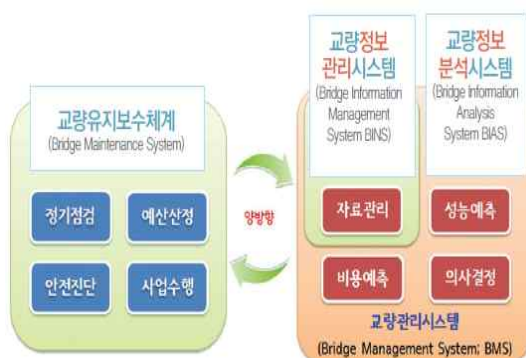
- 유선방식 유지관리 시스템보다 경제적인 무선 유지관리 시스템은 아직까지 국내에서는 도입 초기 단계이나, 국외에서는 무선유지관리 시스템을 통한 실용화 기술로 적용되고 있음.
- 최근 국내에서 시도된 무선센서네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)는 Bluetooth, RFID, ZigBee 등 신호 도달 거리가 짧은 근거리무선통신(PAN:Personal Area Network) 센서노드 기반으로, 최근 건설되고 있는 수 Km에 이르는 시설물을 단일 센서네트워크에서 모니터링이 어려우며, 대형 시설물을 단일 센서 네트워크하에서 효율적으로 모니터링하기 위해서는 신호도달거리가 보다 긴 LPWAN 기반의 센서네트워크 기술개발이 필요함.
- 급격히 늘어나는 노후 시설물과 이들과 함께 급증하는 모니터링의 수요에 대응하기 위해서는 저렴한 센서네트워크 구축과 저비용 유지관리가 가능해야하며, 스마트센서노드 등의 하드웨어와 소프트웨어의 국산화가 필요하여, 또한 국내 환경에서 최적으로 운영될 수 있는 시스템 개발이 필요.

### (3) 효율적인 BMS 구축을 위한 IoT기반 하드웨어 개발의 필요

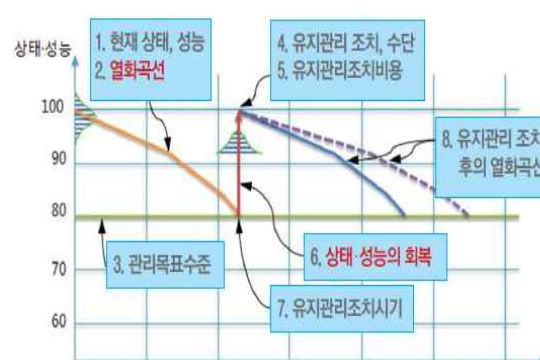
- 최근 우리나라를 비롯해 미국, 일본, 중국, 유럽 등 ICT 강국들을 중심으로 국가차원의 사물인터넷을 지원하고 시장을 선점하기 위한 기술 개발 및 조성이 이루어지고 있음.
- Cisco에 따르면 향후 10년간 사물인터넷이 창출할 수 있는 가치는 14.4조 달러, 공공 부분에서는 4.6조 달러에 이를 것으로 전망.
- IoT기반 적용을 위한 핵심기술 중에 하나인 MEMS기반 센서는 Data값에 대한 신뢰성을 바탕으로 다양한 분야에 적용되고 있으나, 국내 토목분야에서는 유지관리 시스템 분야에서는 아직까지 국외 기술에 의존하여 적용되고 있음.
- 국외에서는 이미 교량분야에 센서 기반기술로 연구진행 및 상용화가 이루어진 상황으로 선진 교량유지관리 시스템과 동등한 기술력 확보가 시급함.

### (4) 국내 노후교량 BMS 구현을 위한 Big Data 구축 및 통합관리 시스템 개선의 필요

- 국토교통부에서는 한국건설기술연구원과 함께 그림 1.12와 같이 교량에 대한 생애주기 분석을 통한 사전적인 보수보강을 위하여 교량 BMS 시스템을 개발(2012년)하여, 교량에서 전달되는 DB를 추출하고 분석하여 교량의 성능을 예측하고 유지보수 의사결정 및 비용예측방안까지 포함되고 있음.



<그림 1.12> 교량유지관리 시스템 체계



<그림 1.13> 사전유지관리 방안에 따른 생애주기 항목

- 또한 국토교통부 이외에 지자체별로 관할 시설물에 대하여 다양한 형태로 표 1.7과 같이 유지관리 시스템을 개발하여 운영되고 있지만, 해당 관리주체의 교류 및 시스템에 대한 공유가 이루어지지 않아 상호 비교분석을 통한 시스템의 신뢰성 검증이 어려운 상황임.

<표 1.7> 국내 교량유지관리 주체별 시스템 보유현황

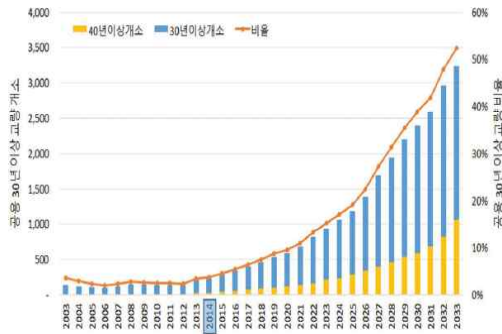
| 도로종류  | 유지관리주체      | 관련시스템              | 개발년도 | 용도                        |
|-------|-------------|--------------------|------|---------------------------|
| 일반국도  | 국토관리사무소     | CALS시설물유지관리시스템     | 2003 | 국도내 교량, 터널, 통로 박스 등 시설물관리 |
|       |             | 도로관리통합시스템(HMS)     | 2002 | 도로관련 시스템의 자료취합, 제공        |
| 고속국도  | 한국도로공사      | HBMS               | 2004 | 고속도로내 교량의 부재 등 정보관리       |
| 시도    | 지방자치단체 사업소  | 도로시설물관리시스템 (서울시)   | 1998 | 교량, 터널, 지하차도, 고가교 등 관리    |
| 모든 도로 | 국토교통부 기술안전과 | 시설물정보통합 관리시스템(FMS) | 2002 | 시특법대상 시설물 정보관리            |

- 위와 같은 주체별 유지관리 관리시스템은 데이터 수집 및 분석과정을 통하여 생애주기 비용(LCC), 교량의 열화모델 자료분석을 통하여 상태등급곡선 등 다양한 결과를 통하여 구조물 안전성을 판단하고 있으나, 아직까지는 국내에서는 교량의 성능평가에 대한 심도 있는 선행연구는 이루어지지 않고 있음.
- 신뢰성을 갖는 교량의 성능평가를 위해서는 다양한 조건(교량의 연장, 폭원, 온도, 폭설, 태풍, 지반조건 등)을 고려한 표준화된 안전성 기준이 마련되어야 하며, 방대한 양의 Data값을 통한 장기적인 거동분석을 기반으로 평가되어야 하기 때문에 통합 Big Data 플랫폼을 통한 성능평가와 이를 위한 개발이 필요함.

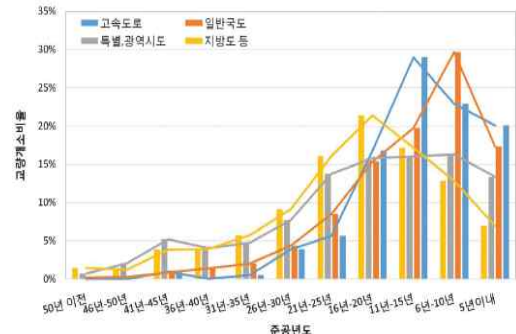
## 나. 경제·산업적 측면

### (1) 교량시설물의 증가 및 유지관리 비용 증가

- 국내 고도성장기(1970년대 이후)에 교량은 주요 인프라 시설 중에 하나이며, 전국 도로 및 철도의 광역화로 인하여 교량구조물 역시 매년 증가하는 추세임.
- 일반적으로 교량구조물은 준공 후 20여년이 지나면 유지보수 필요성 및 비용이 발생 되고 30~40년이 경과되어 개축을 하여야 한다면 2014년 기준으로 그림 1.14~15와 같이 노후 교량 개소수는 10년 후 15%, 20년 후에는 절반 이상에 이르게 될 것이라 보고되고 있음.

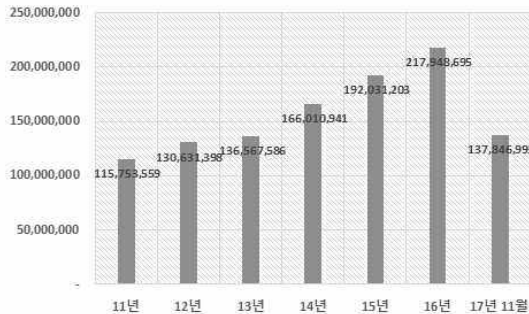


<그림 1.14> 연도별 노후교량 증가추세

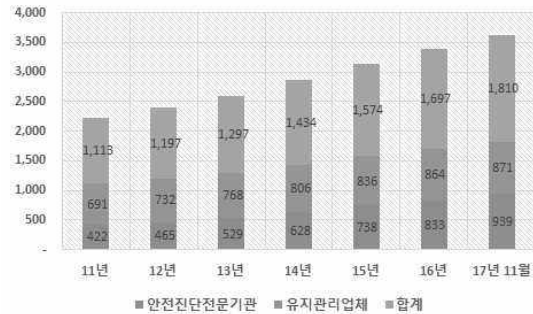


<그림 1.15> 도로구분에 따른 교량 공용수명 비율

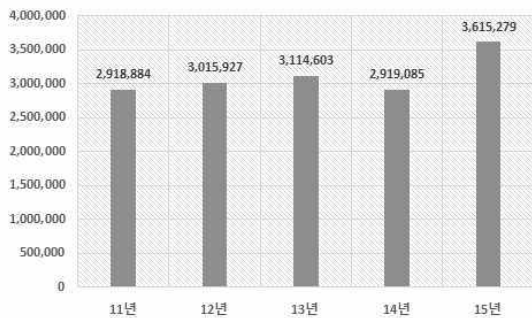
- 최근 국도의 점검 및 진단 시장규모는 그림 1.16과 같이 2017년도에는 약간의 감소되었으나 시장규모는 점차 증가되고 있으며 보수시장규모는 그림 1.18과 같이 일정 수준 또는 점차 증가되고 있음.
- 안전진단 및 유지관리 업체와 유지관리업 등록현황은 그림 1.17과 그림 1.19와 같이 증가되고 있기 때문에 신규 건설뿐만 아니라 유지관리에 보다 깊은 관심이 필요한 실정임.



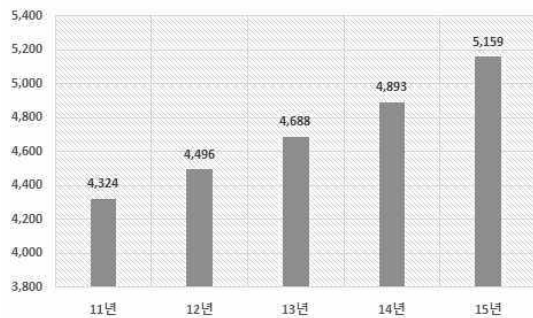
<그림 1.16> 점검·진단 시장규모  
(단위: 천원)



<그림 1.17> 안전진단 및  
유지관리업체(단위: 개)



<그림 1.18> 보수·보강 시장규모(단위:  
백만원)



<그림 1.19> 시설물 유지관리업  
등록현황(단위: 개)

- 건설 초기에는 특별한 유지관리 전략 없이 발생한 손상에 대해 해당 부재의 보수·보강·교체만 이루어지는 사후유지관리에 중점을 두었으나, 최근 교량의 노후교량의 개소수 증가 및 급속한 성능감소를 통한 많은 보수비용을 절감하기 위해 최소한의 모니터링으로 급격한 교량구조물 성능감소 전에 최소의 보수·보강·교체로 성능을 유지할 수 있는 사전유지관리에 의한 운영이 필요.

---

## 다. 사회적 측면

### (1) 시설물 유지관리 분야 제도적인 개선 추진 (제3차 시설물 안전 및 유지관리 기본계획)

- 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획: 정책·제도 선진화, 연구개발 촉진, 우수인력 양성, 효율적인 정보체계 구축에 관한 5년 단위 국가계획(근거: 시설물의 안전 및 유지관에 관한 특별법 제3조)을 수립하였음.
- 「제3차 시설물 안전 및 유지관리 기본계획(2013~2017)」의 4대 전략중 하나는 “지능형 기술 촉진 및 효율화”임.
- 중점 추진과제로는 “융·복합형 진단 및 유지관리 핵심기술 개발”과 “시설물 정보 고도화 및 활용 증진”이 있음.
- 세부추진과제로는 “ICT 기반 시설물 첨단 진단기술 확보”와 “유지관리 분야 BIM 도입 기반 마련” 등이 있음.
- 「제4차 시설물 안전 및 유지관리 기본계획」에도 첨단 IT기술 및 센싱을 통한 스마트한 시설물 유지관리체계 수립 계획 반영 예정으로 첨단 융복합 교량 유지관리 계측시스템 개발이 요구됨.

### 3. 연구개발 범위

| 세부 과제명                                                         | 구분(연도)                         | 주요 연구내용                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 통합모듈형<br>LoRa LPWAN<br>교량 무선계측<br>센서 보드 개발<br>연구<br>(주)동일기술공사) | 1차 연도<br>(2017.04~<br>2017.12) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 가속도계, 온도계, 습도계를 포함한 Prototype 통합 디지털 센서보드 개발(Raspberry Pi 기반)</li> <li>- 기존 상용계측기와 인터페이스가 가능한 LoRa LPWAN 센서네트워크 기반 DAQ 및 센서노드 개발</li> <li>- LoRa Class A/C 센서노드 인터페이스 개발</li> </ul> |
| 교량 LoRa<br>LPWAN<br>무선계측<br>플랫폼 구축연구<br>(주)동일기술공사)             | 2차 연도<br>(2018.01~<br>2018.12) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 교량 안전도 및 건전성 평가를 위한 LoRa LPWAN 무선계측 플랫폼 구축</li> <li>- 교량 무선계측 센서 네트워크 및 미들웨어 개발</li> <li>- 센서 네트워크 Pilot Test 및 성능 평가</li> </ul>                                                    |
| 대용량 계측<br>데이터<br>Big Data<br>시스템개발 연구<br>(주)동일기술공사)            | 3차 연도<br>(2019.01~<br>2019.12) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 대용량 센서데이터를 위한 Influx DB기반 Big Data 시스템 개발 연구</li> <li>- Big Data 무선 계측 교량 유지 관리 시스템 Test Bed 설치 및 성능검증 분석</li> <li>- Big Data 기반 통합 교량관리 시스템 실용화방안 연구</li> </ul>                    |
| 노후교량<br>무선계측<br>유지관리 시스템<br>표준화 및 지침<br>개발 연구<br>(주)동일기술공사)    | 1차 연도<br>(2017.04~<br>2017.12) | - 교량 무선계측시스템에 적용되는 계측기기(센서포함)에 대한 규격(성능)에 대한 표준화 연구                                                                                                                                                                          |
|                                                                | 2차 연도<br>(2018.01~<br>2018.12) | - 교량 무선계측시스템 운용에 필요한 데이터 모니터링 관리기준 설정에 대한 연구                                                                                                                                                                                 |
|                                                                | 3차 연도<br>(2019.01~<br>2019.12) | - 교량 무선계측시스템 시공(설치) 및 유지관리(운용)에 대한 지침 개발 연구                                                                                                                                                                                  |

## 제2장. 국내외 기술 개발 현황

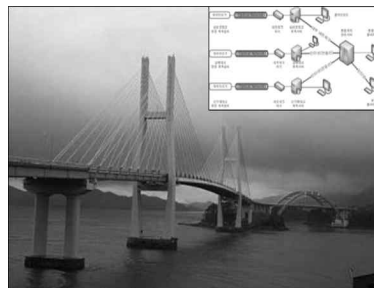
### 가. 국내 현황

#### (1) 국내 교량 유지관리 운영현황

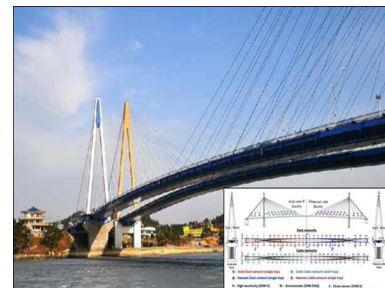
- ① 국내에서는 교량의 유지관리 모니터링 시스템은 그림 2.1과 같이 주로 1등급 교량의 대도심지(서울시 등) 중심으로 운영되고 있으며, 주로 유선방식 유지관리 시스템을 구축하여 운영.
- ② 최근 국내에서는 무선계측 유지관리 모니터링 시스템을 적용하기 위해 국외(미국 유럽 등)에서 개발된 MEMS기반 센서 및 근거리 무선통신(Imote2 방식 등)을 활용하여 특수교 분야에 무선 유지관리 시스템을 Test Bed로 시범 운영하였음.



올림픽대교 (서울, 유선방식)



삼천포대교(경남, 유선방식)



진도대교(전남, 무선방식)

<그림 2.1> 국내 교량별 유지관리시스템 방식

#### ③ 한강상 교량 설치 계측 센서 및 계측 항목

- 현재 한강상 교량은 표 2.1과 같이 가속도계, 경사계 등의 계측센서 및 계측 항목에 따라 설치 운영되고 있으며 데이터 전달 방식은 모두 유선 계측 방식으로 적용.

<표 2.1> 한강상 교량 설치 계측센서 및 계측 항목

| 구분   |             | 계측항목                                                                                                                                                                             |
|------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 가속도계 |             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 거더 및 주탑의 가속도 값으로 고유 진동수와 진동 형상 분석</li> <li>- 상시 케이블의 가속도를 측정하여 케이블 장력 분석</li> <li>- 대상교량 : 올림픽, 행주, 서강, 가양, 한강, 성수, 양화, 암사대교</li> </ul> |
| 경사계  |             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 주탑 및 교각에 발생하는 경사를 측정하여 연직 경사도 분석</li> <li>- 거더의 연직 경사변화를 처짐으로 환산하여 처짐 변화 분석</li> <li>- 대상교량 : 올림픽, 행주, 원효, 가양, 한강, 청담 대교</li> </ul>     |
| 처짐계  |             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 거더의 활하중에 의한 처짐 변화 분석</li> <li>- 대상교량 : 올림픽, 암사대교</li> </ul>                                                                             |
| 변형률계 | 전기 저항식 변형률계 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전기저항식 변형률계로 거더 중앙이나 게르버 힌지플레이트 등 응력 집중부의 활하중에 의한 응력 변동과 피로응력 분석</li> <li>- 대상교량 : 행주, 원효, 성산, 한강, 성수, 암사대교</li> </ul>                   |
|      | 광섬유식 변형률계   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 광섬유식 변형률계로 거더 중앙이나 용접부 등 응력 집중부의 활하중에 의한 응력 변동과 피로 응력 분석</li> <li>- 대상교량 : 성산, 양화대교</li> </ul>                                          |

|       |                                                                                                                                                                                               |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 신축변위계 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 교량 받침 또는 신축 이음부의 온도에 의한 신축 변위 분석</li> <li>- 대상교량 : 올림픽, 행주, 원효, 가강, 한강, 성수, 청담, 암사대교</li> </ul>                                                      |
| 균열계   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 균열부의 외부작용(차량하중, 온도 등)에 의한 변화 상태 분석</li> <li>- 대상교량 : 행주대교</li> </ul>                                                                                 |
| 풍향풍속계 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 주탑 상부 또는 거더에 설치하여 풍향과 풍속 분석</li> <li>- 대상교량 : 올림픽, 암사대교</li> </ul>                                                                                   |
| 온도계   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 거더, 케이블 등 부재에 부착하여 부재별 온도 변화 측정</li> <li>- 신축이음변위, 경사변위 등의 계측항목과의 상관성 분석에 이용</li> <li>- 대상교량 : 올림픽, 행주, 원효, 서강, 성산, 가양, 한강, 성수, 청담, 암사 대교</li> </ul> |

## (2) 유선방식 교량 유지관리 시스템 구축사례 (암사대교)

### ① 주요내용

- 한강상 총 11개 교량에 대하여 유선 자동 계측 기반의 유지관리 시스템으로 운영되고 있음.
- 가장 최근에 구축된 한강상 교량인 암사대교의 자동 계측 시스템(2010년)이며, 그림 2.2~2.3과 같이 8종 44개의 센서를 유선으로 네트워크 구축하여 자동 계측 시스템 구축하였음.



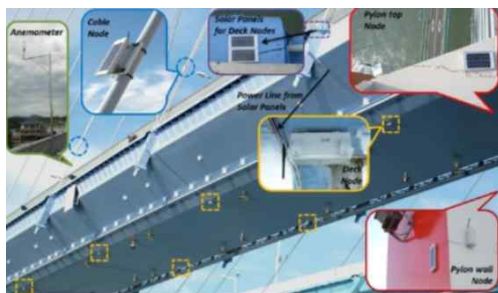
<그림 2.2> 암사대교 모니터링 시스템 전달방식



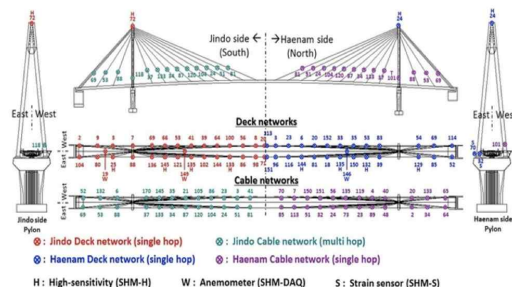
<그림 2.3> 현장계측장비 설치현황

## (3) 무선방식(WSSN) 교량 유지관리 시스템 구축사례 (진도대교)

- 2010년 KAIST, 일리노이 주립대, 동경대 등의 국제 프로젝트로 그림 2.4와 같이 진도대교에 무선계측 시스템을 설치하였으며, 일리노이 주립대학교가 개발한 SHM-A (3축 가속도계, 온도계, 습도계 포함), SHM-W(풍속계)와 IEEE 802.15.4 (Zigbee) 기반의 센서노드 방식으로 그림 2.5와 같이 Test Bed를 적용함.



<그림 2.4> 진도대교 현장계측장비 설치현황



<그림 2.5> 진도대교 무선계측시스템 센서적용 상세도

## 나. 국외 현황

### (1) 국외 유지관리 네트워크 시스템 구축 사례

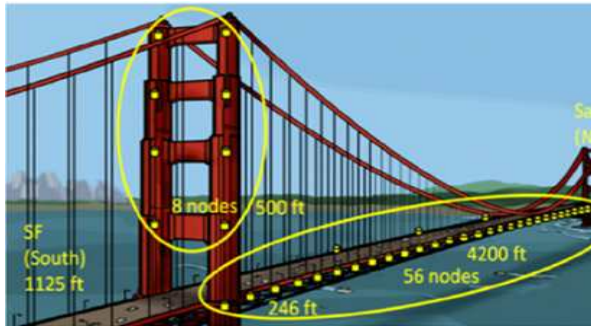
- 국외에서는 SHM(Structure Health Monitoring) 개념을 바탕으로 무선계측 유지관리 시스템에 대한 다양한 연구개발을 진행되었으며, 최근 교량에 적용된 시스템에서는 WSSN (Wireless Smart Sensor Network)기반으로 단위 센서당 저비용으로 구현할 수 있는 시스템 개발을 하고 있는 추세임.
- 최근 Intel사에서 개발한 Zigbee와 Imote2를 이용한 대규모 무선센서 네트워크 구축 사례들은 표 2.2~2.3과 같으며, Test Bed 교량 성능검증을 그림 2.6~2.9와 같이 연구를 수행함.

<표 2.2> 해외 WSSN 이용 교량 무선 자동 계측 시스템 적용사례

| 구 분              | Tsing Ma<br>(Hongkong) | Bill Emerson<br>Memorial | I-35<br>(US) |
|------------------|------------------------|--------------------------|--------------|
| 총 건설 비용          | USD 929 mil.           | USD 100 mil.             | USD 234 mil  |
| 구축 시기            | 1997                   | 2003                     | 2008         |
| 계측시스템 구축비용       | USD 8 mil.             | USD 1.3 mil              | USD 1 mil.   |
| 계측시스템 구축비용<br>비율 | 0.9 %                  | 1.3 %                    | 0.4 %        |
| 총 센서 개수          | 350                    | 86                       | 500          |
| 센서당 비용           | USD 22,875             | USD 15,116               | USD 2,000    |
| 센서 기술            | FOS, 무선                | 무선                       | 무선           |

<표 2.3> 해외 WSSN 이용 교량 무선 자동 계측 시스템 Test Bed 구축 사례

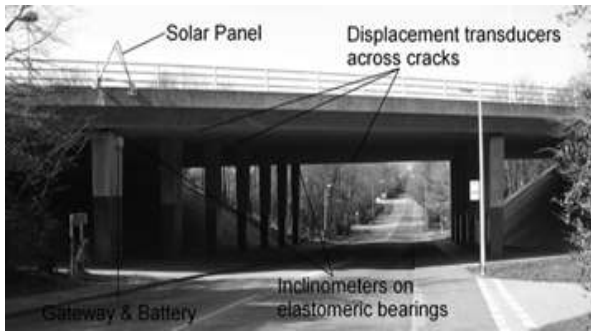
| 구축사례              | 구축<br>시기 | 센서플랫폼                  | 노드<br>갯수 | 센서                               | 실험<br>기간 |
|-------------------|----------|------------------------|----------|----------------------------------|----------|
| Alamosa<br>Canyon | 2003     | WiMMS                  | 7        | 가속도계(14)                         | 단기       |
| Ben Franklin      | 2004     | Microstrain<br>SG-Link | 10       | 장력계 / 온도계(10)                    | 중기       |
| Geumdang          | 2006     | WiMMS                  | 14       | 가속도계(14)                         | 단기       |
| Golden Gate       | 2008     | MicaZ                  | 64       | 가속도계(128)/온도<br>계(64)            | 중기       |
| Gi-Lu             | 2008     | WiMMS                  | 12       | 가속도계(12)                         | 단기       |
| Stork             | 2010     | Tmote Sky              | 6        | 가속도계(6)                          | 장기       |
| Ferriby Road      | 2010     | MicaZ                  | 7        | 균열계(3)/경사계(3)/<br>온도계(7)/습도계(6)/ | 장기       |
| New Carquinez     | 2010     | Narada/Imote2          | 30       | 가속도계(14)                         | 장기       |



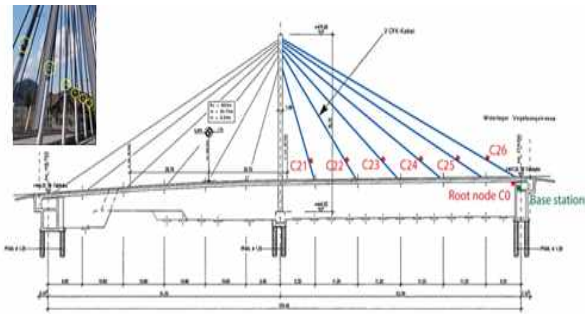
<그림 2.6> Golden Gate Bridge Test Bed



<그림 2.7> New Carquinez Bridge Test Bed



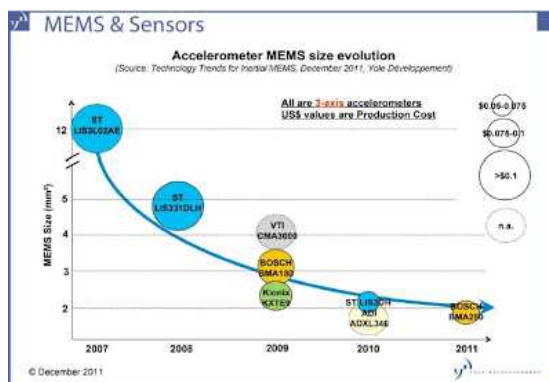
<그림 2.8> NFerriby Road Bridge Test Bed



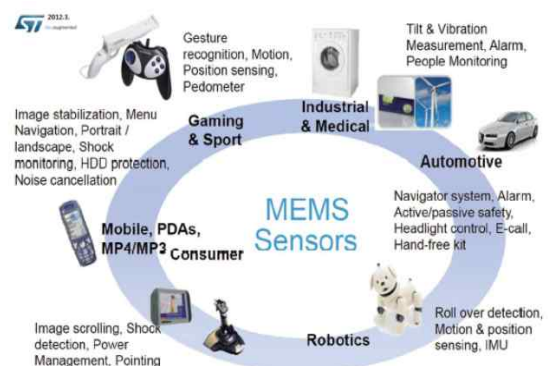
<그림 2.9> Strok Bridge Test Bed

## (2) 유지관리 센서 현황 (국외)

- 국외에서는 이미 유선에 기반을 둔 모니터링 시스템의 고비용 절감을 위한 방안으로 무선으로 대체하는 기술은 1996년 Straser에 의하여 개발되었고, 최근에는 물리기반 센서에서 마이크로칩에 내장되는 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기반 시스템으로 전환이 되고 있음.
- 센서의 대중화 및 생산업체 증가에 따라 그림 2.10과 같이 MEMS Cost 하락에 따른 가격경쟁력 및 신뢰성이 확보하였음.
- MEMS센서는 이미 토목을 제외한 여러 산업분야(휴대폰, 자동차전자부품, 전자제품 등)에서 그림 2.11과 같이 적용되고 있으며, 최근 저비용·저전력 MEMS센서를 활용한 사회 기반시설물의 유지관리 모니터링 핵심기술로 연구를 추진하고 있음.



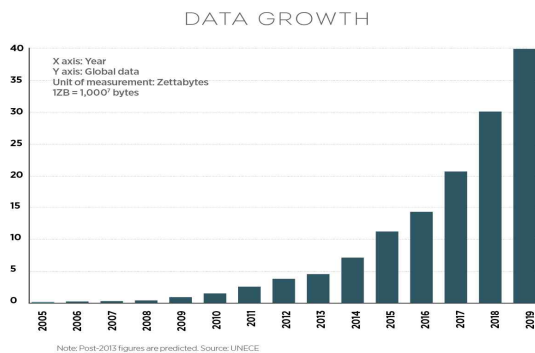
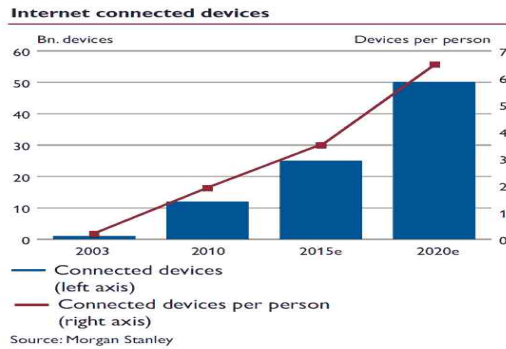
<그림 2.10> MEMS센서의 연도별 COST



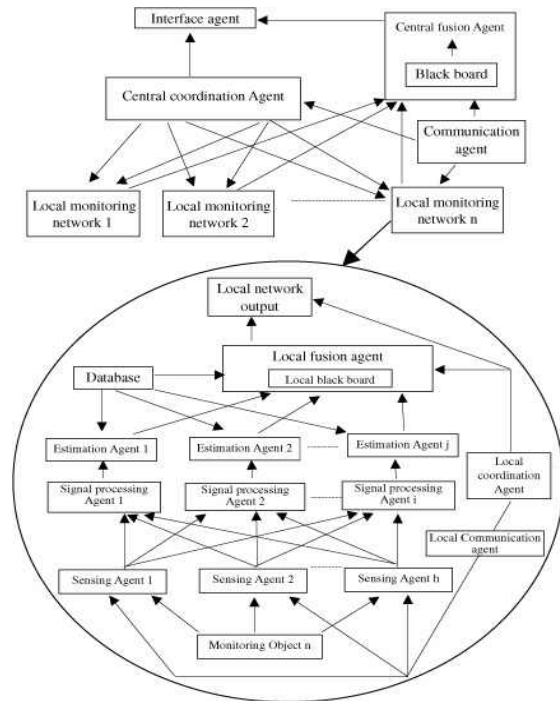
<그림 2.11> MEMS센서를 활용한 다양한 산업분야 활용

## (3) Big Data 유지관리 시스템 관련 현황

- 최근 국내외 IoT기반의 장치들은 그림 2.12와 같이 폭발적인 수요와 다양한 분야에서 적용이 예측됨.
- 향후 수많은 망연동 단말(Device)과 Data로 인하여 수집된 Data 값에 대한 보관, 처리, 추출 등이 그림 2.13과 같이 체계적인 관리가 필요하며, 이러한 Data에 대한 종류에 따른 효율적인 Big Data 분산처리를 위한 센서네트워크 시스템 개발을 연구가 추진되고 있음.



<그림 2.12> 망연동 단말의 증가와 Big Data 추세



<그림 2.13> Big Data 분산 처리를 위한 센서네트워크 시스템

- 최근 SHM 분야에 다양한 Big Data 분석 기법들이 시도되고 있으며, Yu Liang 등은 미국 전역의 노후 교량을 대상으로 기상 데이터, 교통 데이터, 계측 데이터, 구조 정보 등의 대용량의 이중 데이터들에 대해 Big Data 분석결과를 적용해서 교량의 전역 건전성 분석(Global structural integrity analysis) 및 국부 위험 요소 신뢰성 분석(Localized critical component reliability analysis) 등에 관해 보고하였으며, Guowei 등은 Hadoop, Map Reduce 등의 Big Data 분석 기법 등을 적용한 연구가 진행 중임.

#### (4) Big Data 관련 구조물 모니터링 논문 및 보고서

- Big Data Fractal Analysis for Structural Health Monitoring, Valeriy L. VENGRINOVICH et al. (2014)
- Big Data-enable multiscale serviceability analysis for aging bridges, Yu Liang et al. (2016)
- Big Data Analysis in Online Structural Health Monitoring, Guowei Cai. (2016)
- Big Data and high-performance analytics in structural health monitoring for bridge management, Alampalli et al (2016)
- "Field Validation of a Wireless Structural Monitoring System on the Alamosa Canyon Bridge", Lynch, J.P et al SPIE 10th, San Diego, CA, USA, March, 2003.

## 다. 선행연구내용 및 결과

### (1) 주관연구기관 관련 연구과제 수행실적

#### ① 선행연구 과제주요내용

- 주관연구기관의 교량 유지관리 시스템 개발관련 유사 연구과제 수행실적은 표 2.4와 같이 노후교량에 대해 RFID/USN 기반 무선네트워크 통신기술, 플랫폼구축, 친환경 에너지 적용기술 구현방안 등의 개발목적으로 연구수행

<표 2.4> 주관연구기관 R&D 수행실적 주요내용

| 부처명         | 사업명              | 과제명                | 예산           | 비 고 |
|-------------|------------------|--------------------|--------------|-----|
| 국토교통과학기술진흥원 | 2006<br>건설기술혁신사업 | RFID/USN<br>기반감시기술 | 553,500,000원 |     |

### (2) 연구과제 주요내용

#### ① 개발목적

- 교량시설물의 안전한 사용과 품질 향상을 위해 국내 기존 교량에 대한 유지관리 현황 및 상시 모니터링 시스템 분석, 계측센서 기술과 무선통신 기술을 활용하여 새로운 형태의 유비쿼터스 기반으로 USN을 활용한 교량 안전관리 네트워크 시스템 개발을 목적으로 함.

#### ② 세부연구내용

- USN 송수신 모듈 개발
- 개발된 송수신 모듈을 이용한 Pilot test : 삼교대교
- 한강상 교량 올림픽대교에 Test bed 구축
- 상시 계측을 위한 모니터링 시스템 개발
- 계측된 데이터의 신뢰성 평가를 위한 유/무선 계측 데이터 분석
- 네트워크 연구단 통합시스템 연동 구축

### (3) 연구과제 주요성과

#### ① USN 데이터 송수신 모듈 개발

- USN 송수신 모듈 및 자체전력용 Solar Cell을 이용한 저전력 통신구현 모듈 개발을 추진하였음. (표 2.5 참조)

<표 2.5> USN 송수신 모듈 및 자체전력용 Solar Cell 주요내용

| USN 송수신 모듈 및 자체전력용 Solar Cell                                                       |                                                                                     |                                                                                     | USN 송수신 모듈 특징                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Buffer Memory 사용</li> <li>- 계측주기 및 시간 조정(S/W)</li> <li>- 2.4GHz, IEEE 802.15.4 기반</li> <li>- ADC 24bit 센서 구동회로</li> <li>- 신호증폭기, Low Pass Filter 내장</li> <li>- 친환경 태양광 전력 독립전원 사용</li> </ul> |

② 교량 유지관리 모니터링 프로그램 개발

- Test Bed로 적용된 서울시 관내 올림픽 대교에 3축가속도계, 경사계, 풍향풍속계 등을 설치하여 센서의 I/O특성 등을 고려하여 표 2.6과 같이 계측센서별 팝업창을 통한 실시간 모니터링이 가능하도록 인터페이스를 구현.
- 교량 유지관리 모니터링 프로그램 GUI의 인터페이스는 표 2.6와 같이 개발하였음.
- 교량 유지관리 모니터링 프로그램 주요 기능은 표 2.7과 같음.

<표 2.6> 교량 유지관리 모니터링 프로그램 GUI 인터페이스



<표 2.7> 교량 유지관리 모니터링 프로그램 주요기능

| 구 분             | 내 용                                                                                                 |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 계측 모니터링 운영 프로그램 | - 계측을 수행하여 입력되는 계측결과를 처리, 분류, 저장하는 기능 수행                                                            |
| 사용자 인터페이스       | - 사용자가 쉽게 판단, 처리할 수 있도록 그래픽 인터페이스를 적용 활용하여 구축                                                       |
| 통계처리 및 신호처리     | - 계측과 동시에 기본적 통계처리 및 필요한 자료만 자동 필터링 하는 알고리즘을 적용하여 자료의 저장 용량을 줄이며 비상시 경보시스템을 가동하여 즉각적인 조치가 이루어지도록 구축 |
| 자료 백업 및 복원      | - 계측과 동시에 자료를 백업함으로써, 유사시DB를 복원하여 데이터 유실을 방지하고, 관계형 데이터베이스(RDBMS)을 구축함으로써 자료관리 기능을 통합               |
| 네트워크를 이용한 제어    | - 운영자가 다른 위치에서도 관리할 PC에서 CDMA 또는 ADSL을 이용하여 전송된 계측 값 모니터링                                           |

### ③ USN을 활용한 교량 안전관리 네트워크 시스템 현장적용 Test Bed

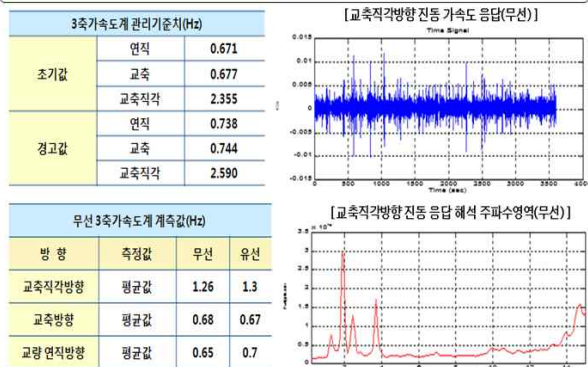


<그림 2.14> RFID USN 올림픽대교 Test Bed 현장적용



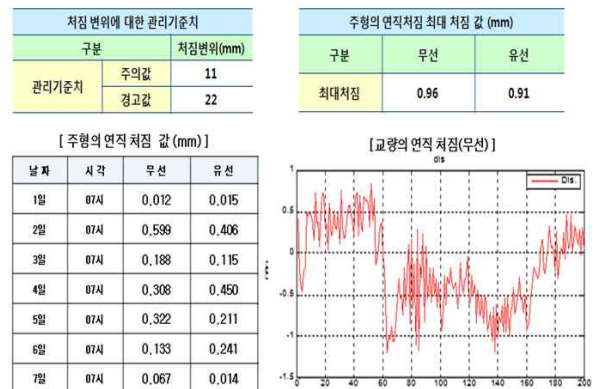
<그림 2.15> 올림픽대교 모니터링 통합관리 프로그램

- 계측대상 및 방법: 주형의 연직방향, 교축방향, 교축직각방향의 고유진동수와 관리기준치와의 비교를 통한 교량의 안전상태 파악
- 계측방법: 초당 100개의 데이터 수집(가속도g) -> FFT 분석을 통한 고유진동수 추출



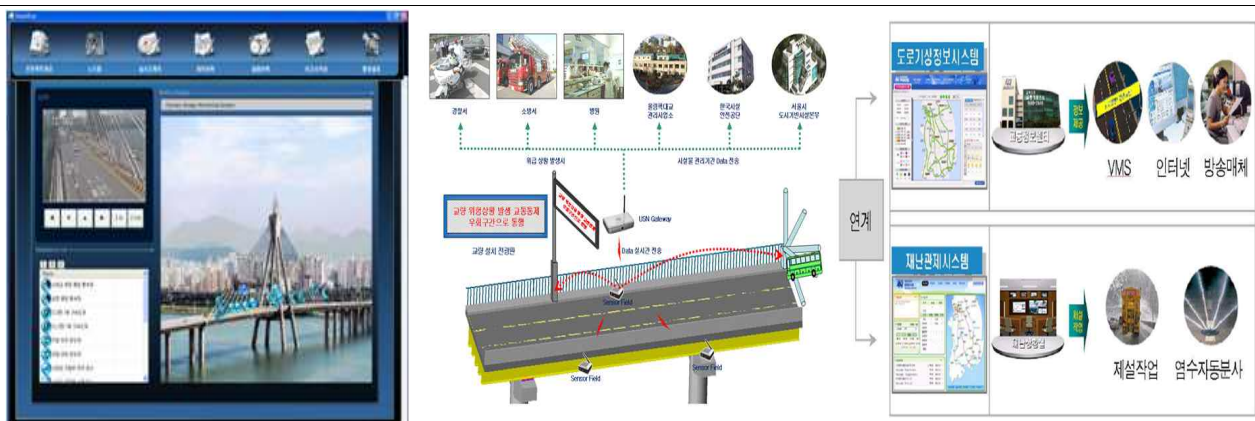
<그림 2.16> Data 계측 및 검증 (3축가속도계)

- 계측대상 및 방법: 상시 진동하중에 의한 주형의 처짐 변위 측정
- 계측방법: 초당 1개의 데이터 획득



<그림 2.17> Data 계측 및 검증 (경사계)

### ④ USN을 활용한 교량 안전관리 네트워크 시스템 실용화



<그림 2.18> 교량 모니터링의 활용 및 사업화방안 도출

(4) 타기관 선행연구 주요내용

<표 2.8> 타기관 선행연구 주요내용

| 부처명           | 사업명                      | 과제명                                                 | 예산(백만원) | 비 고 |
|---------------|--------------------------|-----------------------------------------------------|---------|-----|
| 중소벤처기업부       | 산학연<br>공동기술개발<br>컨소시엄 사업 | 계측기반 교량유지관리 시스템 개발                                  | 61      |     |
| 국토교통부         | 건설핵심기술<br>연구개발사업         | 무선통신 기반의 지능형 계측시스템<br>개발 및 대형교량의 효율적<br>유지관리 체계 실용화 | 354     |     |
| 중소벤처기업부       | 산학연공동<br>기술개발            | 구조물 내하력 측정을 위한<br>무선원격 검측 시스템 개발                    | 36      |     |
| 중소벤처기업부       | 산학연공동<br>기술개발            | RFID를 이용한 교량안전<br>점검시스템 개발                          | 64      |     |
| 과학기술정보<br>통신부 | 학문후속<br>세대양성지원           | 현수교 구조건전성 평가를 위한<br>스마트 무선센서시스템 개발                  | 25      |     |

## 제3장. 연구수행내용 및 성과

### 1. 연구목표별 연구개발 수행 내용 및 주요 결과

| 연구 목표                                                          | 연구개발 수행 내용                                                                                        | 주요 연구 결과                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 통합모듈형<br>LoRa LPWAN<br>교량 무선계측<br>센서 보드 개발<br>연구<br>(주)동일기술공사) | - 교량 유지관리 모니터링을 위한 해외 MEMS기반 센서 보드 분석                                                             | - MEMS기반 센서 및 Zigbee 및 Imote2 기반의 스마트센서노드를 이용하여 교량의 유지관리 모니터링을 위한 상용화 및 Test Bed를 통한 기술개발을 수행하고 있음.                                                                                                             |
|                                                                | - 3축가속도계, 온도계, GPS를 포함한 Prototype 통합 디지털 센서 보드설계 및 개발                                             | - Raspberry Pi 기반 Prototype DAQ / LoRa 센서노드 인터페이스 구현함.<br>- 교량 구조건전성 모니터링을 위한 MEMS 기반의 3축 가속도계, 온도계, GPS를 포함하는 통합 디지털 센서 보드 설계 및 개발함.<br>- 교량 계측센서 Data로 구조건전성 평가를 위해 가속도 계측 데이터 분석(분산 처리) Tool(FFT, PSD)을 구현함. |
|                                                                | - 통합디지털 센서 보드 계측 데이터 수집 및 분석을 위한 DAQ 보드 및 기존 상용 계측기의 인터페이스 구축방안 (Serial / Analog I/O interface 등) | - 통합 디지털 센서보드 및 기존 계측기의 계측 데이터 수집 및 분석, 무선 송수신을 위한 Raspberry Pi 기반 LoRa 스마트 센서노드 / Application 서버를 구현함.<br>- 상용 계측기의 I/O(전류, 전압, Digital) 및 통신 프로토콜(RS-485, RS-232 등)을 고려한 인터페이스 구현함.                           |
|                                                                | - 실내 Lab Test를 통한 LoRa Data 송수신 여부 검증연구                                                           | - LoRa 기반 Prototype 센서노드를 통한 실내 Lab Test로 국내 ISM대역을 고려한 LoRa 네트워크를 통한 Data 데이터 송수신이 되는 것을 검증함.<br>- Lab Test를 통한 Data 전송률 및 Scalability 개선을 위한 LoRa WAN 개선 방안 도출함.                                              |
|                                                                | - LoRa 방식의 LPWAN 센서 네트워크 플랫폼 개발방안                                                                 | - LoRa 방식의 LPWAN 센서네트워크 플랫폼 개발 (Sensor Nodes + Gateway + Network Server) 방안 도출.<br>- LoRa Network / Application 서버 구현 방안 도출.                                                                                    |

|                                          |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 교량 LoRa LPWAN 무선계측 플랫폼 구축연구<br>(주)동일기술공사 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Linux 기반 LoRa 스마트 센서노드 및 기존 상용 계측기와 연동 가능한 LoRa DAQ 보드 개발 연구</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- MEMS기반 계측센서 및 기존 센서들의 계측 신호를 수집하고 처리할 수 있는 LoRa 기반의 스마트 센서노드 설계 / 제작.</li> <li>- LoRa 기반 스마트 센서노드 구현을 위한 PCB보드 제작 완료(Linux OS 기반으로 LoRa 스마트 센서노드 Application 구현.</li> <li>- ADR(Adaptive Data Rate) 구현을 통한 Scalability를 확보.</li> <li>- LoRa LPWAN 센서보드/스마트센서노드를 위한 펌웨어 개발.</li> <li>- SSL/AES 구현을 통한 단말, 네트워크 암호화 구현.</li> <li>- 저전력 LoRa 네트워크 구현 및 실용화를 목적으로 기존 Linux OS기반에서 RTOS 기반으로 변경 제작(스마트 센서노드에 해당).</li> <li>- 케이블 자동 장력 검출을 위한 가속도 데이터의 FFT, 자동침두 검출(Auto Peak Detection).</li> <li>- LoRa DAQ Analog(전압,전류,저항타입)/Digital I/O(RS232, RS485) 입력 처리를 위한 펌웨어 제작 및 인터페이스 구현.</li> </ul> |
|                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- LoRa Alliance 표준을 기반한 무선자동계측 플랫폼 구축</li> </ul>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- LoRa Gateway Bridge / LoRa Network Server/ LoRa Appserver / Web 기반 Monitoring Server를 구현.</li> <li>- SSL/AES 구현 통한 단말, 네트워크 암호화 구현함.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Linux 기반 LoRa 스마트 센서노드 Pilot Test를 통한 성능검증 연구</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chamber Test 통한 센서보드 실험을 통해 센서 내환경성 및 내구성 검증을 완료함</li> <li>- 전주천교, 돌산대교 Pilot Test 계획 및 설치를 통하여 센서의 정확도 및 LoRa Data 송수신 Pilot Test 수행.</li> <li>- 기존 유선계측 케이블 가속도계와 본 시스템(무선계측통합센서)과 비교로 Data 정확도를 검증함.</li> <li>- 테스트베드 구축을 통한 현재 사용 중인 센서 및 DAQ와의 비교 / 검증함.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- RTOS 기반 LoRa 스마트 센서노드 및 LoRa DAQ 보드 Test Bed를 통한 성능검증 연구</li> </ul>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 한국시설안전공단에서 관리중인 영광대교(사장교)에 온도계, 신축변위계, 3축가속도계를 설치하여 LoRa 스마트 센서노드 및 LoRa DAQ 보드에 대한 장기적인 내구 성능 및 데이터 정확도 비교검증 수행함.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

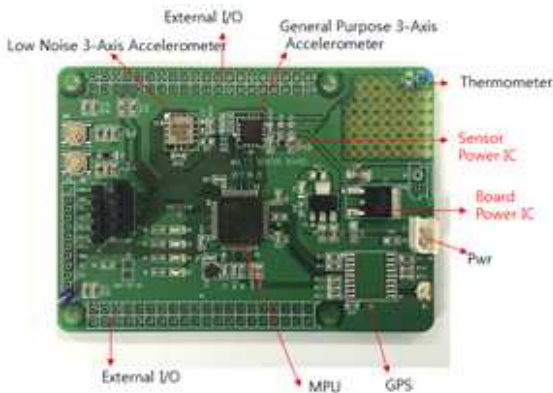
|                                                                             |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                             |                                                                                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 장기 Test Bed 구축 및 운영을 통한 센서네트워크의 성능분석 및 데이터 송수신 커버리지, Scalability, 송신률 등을 검증.</li> <li>- 2019.09부터 테스트베드를 통한 장기 모니터링을 수행하여, 데이터 정확성, 커버리지, 송수신율, 내구성 등에서 개발 기술의 교량 유지관리 모니터링에 적용 가능성을 검증.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <p>대용량 계측 데이터<br/>Big Data<br/>시스템개발<br/>연구<br/>(주)동일기술공사)</p>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 대용량 계측데이터 저장, 처리, 송신을 위한 Big Data 시스템 개발방안 연구</li> <li>- Big Data 무선 계측 교량 유지 관리 시스템 구현 및 Test Bed를 통한 성능분석</li> <li>- Big Data 기반 통합 교량관리 시스템 실용화방안 연구</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 인터넷 크롤링(crawling)을 통해 수집된 Big Data 에 대한 검색엔진 용도로 개발된 하둡(Hadoop)기반 시스템은, 근간이 되는 HDFS(Hadoop File System)이 세밀한 파일조작에 어려움이 있고, 데이터분석을 위한 맵리듀스(Map Reduce) 과정의 구조적 특징으로 인해, 초당 수만, 수십만 건이 발생할 수 있는 IoT 센서데이터를 처리하기 어려움.</li> <li>- 본 연구에서 적용된 InfluxDB 등의 시계열(Time Series) 데이터베이스 시스템은 실시간 데이터 흡수, 처리, 데이터 압축, 다운샘플링 가능 등 IoT 시계열 데이터에 최적화된 특징들 지님.</li> <li>- LoRa Network 및 Application Server와 InfluxDB 연동을 통한 시스템 통합 구축 및 Grafana 대시보드를 통한 데이터 모니터링 구축함.</li> </ul> |
| <p>노후교량<br/>무선계측<br/>유지관리<br/>시스템 표준화<br/>및 지침 개발<br/>연구<br/>(한국시설안전공단)</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 교량 무선계측시스템에 적용되는 계측기기(센서포함)에 대한 규격(성능)에 대한 표준화 연구</li> </ul>                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 교량에 대한 유지관리를 목적으로 계측되고 있는 유선계측센서를 바탕으로 무선 계측기기로 도입하기 위한 센서의 SPEC을 결정하여 계측기기 규격 표준화 방안에 대한 가이드(안)을 도출하였음.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 교량 무선계측시스템 운용에 필요한 데이터 모니터링용 관리기준 설정에 대한 연구</li> </ul>                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 본 연구과제를 통하여 개발된 무선계측시스템에 대해서 관리자의 해당 시설물의 유지관리 기준 (목적, 현장여건 등)을 설정하여 계측빈도, 계측방법 등에 대한 방안을 무선계측시스템 관리기준 가이드(안)을 도출하였음.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 교량 무선계측시스템 시공(설치) 및 유지관리(운용)에 대한 지침 개발 연구</li> </ul>                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 교량 시설물에 대한 실시간 감시를 통하여 사전 구조물 손상을 방지하고 이러한 감시에 대한 기존 대비 인력과 비용을 줄이기 위한 무선계측시스템을 도입하고자 하는 목적으로 이러한 무선계측시스템에 대한 설계 및 설치에 대한 세부적인 사항을 제시하고 이러한 표준화된 운영을 제공하기 위해 무선계측시스템 시공 및 유지관리 가이드(안)을 도출하였음.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                            |

## 2. 연차별 세부 수행 내용 및 결과

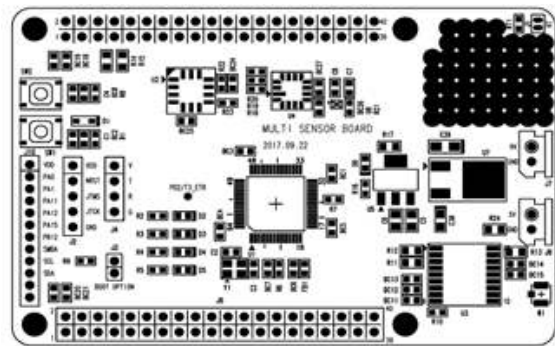
### 가. 1차년도 세부 연구내용 및 결과

#### (1) 동일기술공사 (주관연구기관)

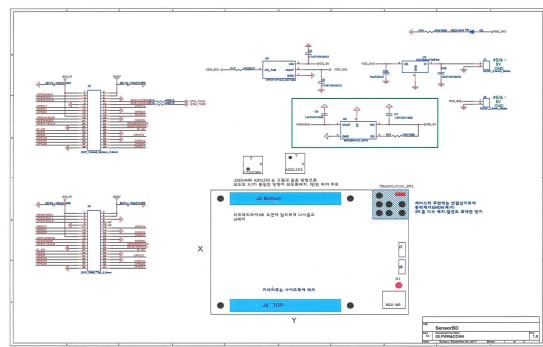
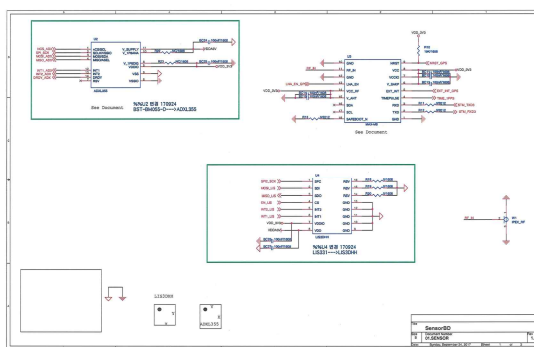
- ① 연구1 : 3축가속도계, 온도계, GPS를 포함한 Prototype 통합 디지털 센서 보드설계 및 제작
- ㉓ MEMS 기반의 3축 가속도계, 경사계, GPS, 온도계를 포함하며 계측결과들은 Raspberry Pi 기반으로 제작된 DAQ(Data Acquisition)로 전달되어 수집, 저장, 해석되며 최종 데이터는 LoRa 센서노드를 통해 서버로 전송하도록 설계함.
- ㉔ Raspberry Pi 기반 계측 결과에 대한 Data전달, 전력, MEMS기반 센서 등의 LoRa 네트워크 송수신을 위한 모듈 및 Device에 대한 설계도 및 제작품은 아래의 그림 3.1~3.2와 같음. 또한 국내 ISM대역 기반 LPWAN의 하나인 LoRa의 Data 송수신 가능성 검증을 위해 Prototype 통합 디지털 센서 보드설계는 그림 3.3과 같이 제작하였음.



<그림 3.1> 디지털 통합보드 제작사진



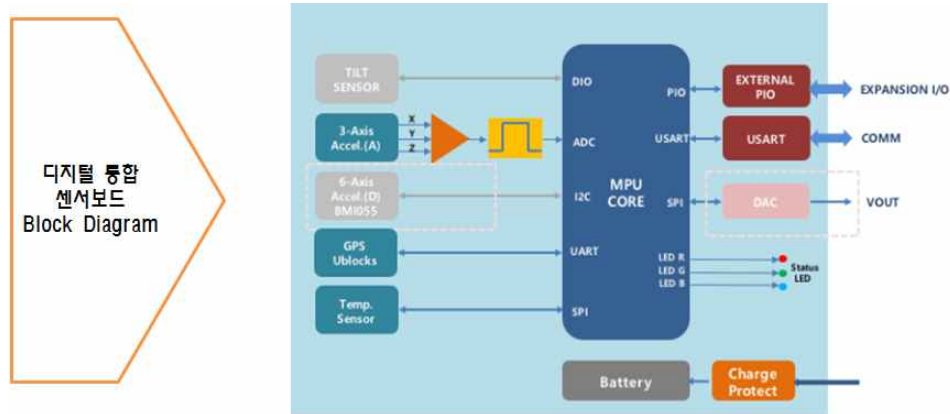
<그림 3.2> 디지털 통합보드 설계도



<그림 3.3> 디지털 통합보드 제작사진

- ㉔ 센서보드가 설치되는 외부환경은 온도, 습도 변화가 심하고 노이즈, 진동, 분진에 의해 내구성이나 신뢰성 확보에 불리한 조건이기 때문에 통합 모듈 센서보드의 내구성과 신뢰성 확보를 위해 아래와 같은 방법들을 사용
  - 산업용 디바이스 소자 채용 (동작 온도 범위 :  $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ )
  - 디지털, 아날로그 전원 및 Ground 분리
  - 메인 디지털 회로와 아날로그(ADC/DAC 등) 회로에 대한 전원을 분리하여 노이즈에 대한 내구성을 고려하여 설계.

- PCB 보드 설계 시 디바이스간 충분한 간격 확보(상호 간섭 회피)와 일반적인 회로 대비 배선 폭을 넓히고 라우팅은 최소화한 설계를 진행함.
- 각 디바이스간의 노이즈 전파를 최소화하기 위해 디바이스별 LC로 구성된 Noise Bypass Filter 배치.
- Thermometer(온도계)는 보드의 우측 상단 끝에 배치하되, 보드의 발열 영향을 피하기 위해 주변 15mm에는 연결선 이외에 동박을 제거하고 센서 주변에 홀을 여러개 뚫어 열전도를 최소화 하도록 설계함.
- 크랙 발생의 가능성이 높아지는 외부환경(온도 변화가 심함, 잦은 진동발생)을 고려하여 보드 설계 (납의 높은 정도에 따른 크랙발생 방지 목적).



<그림 3.4> 디지털 통합 센서보드 프로세스

㉠ 디지털 통합 PCB 보드에 각 구성별 유닛에 대한 상세 제원은 표 3.1과 같으며, 각 유닛별 세부적인 상세내용은 아래의 내용과 같음.

<표 3.1> 디지털 센서보드 유닛별 상세제원

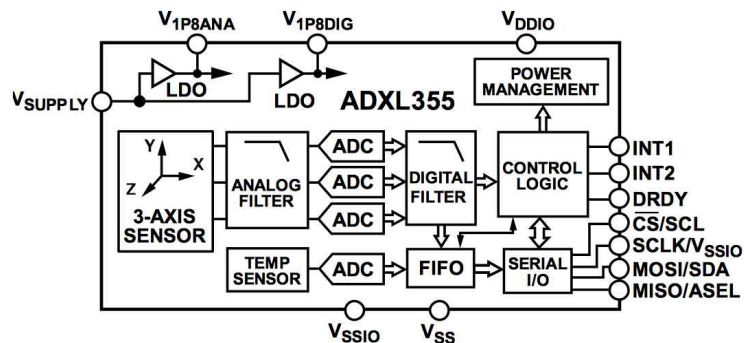
| 구분            |                      | 내용                                                                                                                                                                |
|---------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MPU           | ST STM23F103Rx       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sampling 제어, 센서 Data수집</li> <li>- ADC/DAC, LED 점멸제어</li> <li>- Low Pass Filter</li> <li>- Data 전송(115,200bps)</li> </ul> |
| 3-Axis Accel. | Analog DeviceADXL355 | - Low Noise, High Sensitivity                                                                                                                                     |
|               | STMicro LIS3DHH      | - General Purpose                                                                                                                                                 |
| GPS           | MAX-M8               | - 3 GNSS 수신(GPS, GLONASS, BeiDou)                                                                                                                                 |
| Thermo meter  | NTCThermistor        | - Tolerance : 1.00%                                                                                                                                               |
| LDO           | AP2114H-3.3          | - Digital Main Power IC                                                                                                                                           |
|               | MIC5504-3.0          | - Accelerometer 및 MPU ADC/DAC Power IC                                                                                                                            |

[MPU]

- STMicro의 ARM 기반 STM23F103Rx를 사용하였으며, STM32F103 디바이스는 Arm Corex-M3 코어기반으로 최고 동작 클럭 스피드는 72MHz이며 768KByte의 플래시메모리와 96KByte의 RAM 용량을 갖추고 있음.
- 가속도계, GPS, 온도계 등으로부터 계측된 Static/Dynamic data를 수집하고 처리하는 역할을 수행함.
- 데이터 획득 및 1차적인 Low Pass Filter 기능을 수행.
- Sampling rate : 1 Ksps(Kilo Samples per sencond)
- Data 전송 : 115,200 bps 의 속도로 USART 전송

[가속도계]

- Bosch社의 고성능 가속도계(ADXL355와 STMicro社)와 일반성능 가속도계(LIS3DHH) 두 종류의 3축 가속도계를 적용.
- 두 센서의 가장 큰 차이점은 노이즈 레벨이며, 제원상 ADXL355 센서가 LIS3DHH에 비해 노이즈에 강하며, ADXL355 센서의 Block Diagram은 그림 3.5와 같음.
- 교량 구조 건전성 모니터링의 특성상 Low Noise, High Sensitive 특징이 필요하나, 고성능 센서(ADXL355)와 일반 성능 센서(LIS3DHH)의 상당한 가격 차이가 발생되기 때문에 제품의 경제성과 정확성을 위해 향후 Test Bed 구축에 따른 각 센서의 성능검증을 통하여 최종 적용센서로 결정하기 위한 목적으로 설계.



<그림 3.5> ADXL355 Low Noise, Low Drift, Low Power  
3축 가속도계 Block Diagram

### [센서보드 패킷구성]

- 패킷 크기 : 42 Bytes
- 패킷 발생 주기 : 100 Hz
- 통신 속도 : 115,200 bps
- 통신 점유율 : 36.5 %

[기타 주요 내용]

- 센서 보드 : 고감도 3축 가속도 센서(2개), GPS, 온도계를 갖추고 있으며 3축 가속도계의 샘플링 레이트(sampling rate)는 필요에 따라, 50Hz~250Hz 사이에서 프로그래밍 가능하도록 설계.
- LoRa 모듈은 온보드 제품이 아닌 Raspberry Pi와 인터페이스 할 수 있는 쉴드(Shield)형태로 Dragino사의 LoRa/GPS HAT을 사용하였음.  
(제품출처 : <http://www.dragino.com/products/lora/item/106-lora-gps-hat.html>).

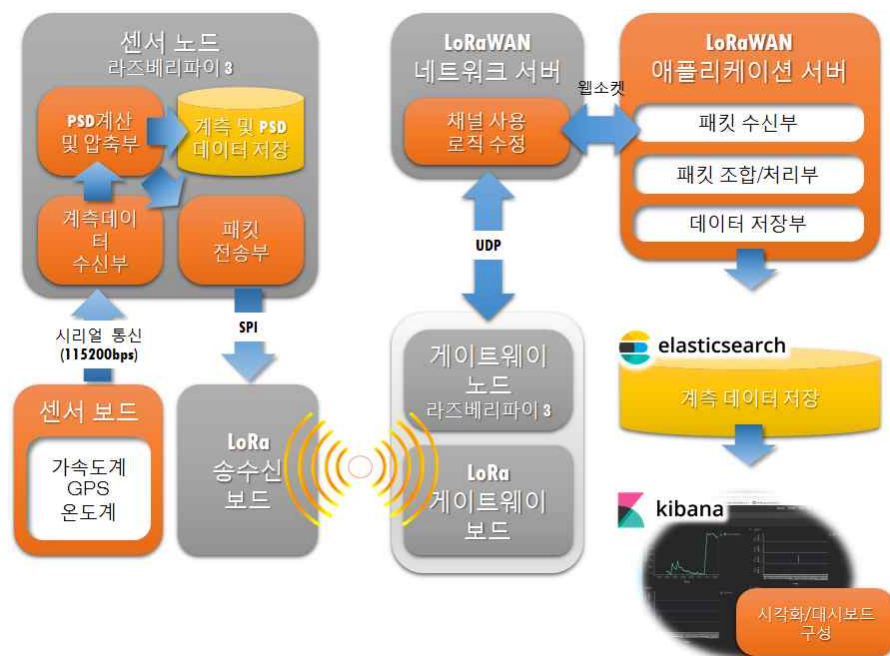
## ② 연구2 : Raspberry Pi 기반 Prototype DAQ 및 센서노드 개발

### ㉓ DAQ 및 센서노드 개발 목적

- MEMS기반 센서가 적용된 센서보드를 통하여 센서노드에서 Data를 가공하여, LoRa 무선통신 환경에서 어느 정도의 대역폭으로 데이터를 전송하고 후처리할 수 있는지를 살펴보는 것을 목적으로 제작.
- 기존 LoRa 네트워크는 서버에서 수신한 패킷의 수를 제한하는 등 제약이 따르므로, 센서 노드를 비롯하여 게이트웨이(기지국)와 네트워크 서버, 애플리케이션 서버까지 단대단으로 시스템을 구축하여 시험을 목적으로 제작.

### ㉔ Raspberry Pi 기반 DAQ 구성 및 주요내용

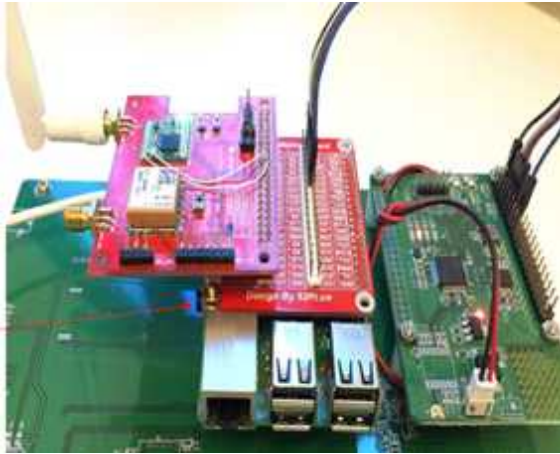
- 전체 DAQ 구성은 아래의 그림 3.6과 같으며, DAQ는 LoRaWAN Network Server 및 LoRa WAN Application Server로 구성됨. (본 과제에서 개발한 부분은 주황색으로 표시하였음.)



<그림 3.6> Raspberry Pi 기반 DAQ 구조

- DAQ에서는 MEMS기반 센서신호를 받아 가공/압축하고 LoRa 송수신 보드를 통하여 데이터를 전달하기 위해 Raspberry Pi(라즈베리파이)와 오픈소스인 LMIC 1.6 LoRaWAN 프로토콜 스택을 적용하여 그림 3.7~3.8과 같이 시작품을 제작함.
- 온도는 주기적으로 매 20초 마다 측정하여 전송하고, 가속도 데이터는 200초 동안 50Hz의 샘플링레이트(sampling rate)로 샘플링하여 FFT (Fast Fourier Transform)를 이용한 PSD (Power Spectral Density)로 계산한 후 계산된 PSD Data를 압축하여 허용되는 페이로드 크기에 따라 여러 패킷으로 나뉘어서 송신할 수 있도록 구현함.
- LoRa 게이트웨이(Gateway)보드: 라즈베리파이 상에서 쉴드(Shield) 형태로 구현할 수 있는 RisingHF사의 RHF0M301을 기준으로 설계함.
- Raspberry Pi 3와 인터페이스하여 LoRa 게이트웨이와 송수신 가능하도록 소프트웨어로 구현하였으며, 네트워크 관리는 모두 서버에서 담당하므로 게이트웨이는 네트워크 서버에 수신한 패킷과 그에 관련된 정보를 UDP로 전송하고 네트워크 서버에서 UDP 지시한 명령대로 센서 노드에 패킷을 보내도록 되어 있음.

- LoRaWAN 네트워크 서버는 여러 게이트웨이를 관리하여 LoRaWAN 패킷을 받고 수신 여부에 대한 수신 확인(Confirm) 신호를 보내거나 애플리케이션에서 클라이언트에 보내는 Data를 보내는 등 LoRaWAN 네트워크가 기능하기 위한 로직을 포함하고 있으며 오픈소스 서버를 사용하기 때문에 목적에 맞도록 일부 코드를 수정하였음.



<그림 3.7> 센서노드 시작품 제작사진



<그림 3.8> LoRa 게이트웨이(G/W) 시작품 제작사진

- 애플리케이션 네트워크 서버는 LoRaWAN 네트워크를 관리하는 것이 목적이고 응용 로직은 모두 애플리케이션 서버에 별도로 구현하였으며 MQTT, 웹소켓 등 다양한 프로토콜로 애플리케이션 서버와 통신할 수 있도록 하여야 하나 본 과제에서는 단순히 웹소켓으로 설정하여 적용함.
  - 애플리케이션 네트워크 서버는 자바(JAVA) 언어로 작성되었고 받은 패킷을 조합하여 Elasticsearch에 저장하는 형태로 설계하였음.
    - ※ *Elasticsearch: 오픈소스 데이터베이스로 검색 엔진으로 유명하지만 데이터베이스로도 사용하며 Big Data 실시간 분석용으로 많이 사용.*
  - Kibana: Elasticsearch와 함께 사용될 용도로 개발된 시각화 도구(사용자 GUI구현)로 이를 이용해서 온도 및 3축 각각의 PSD를 시각화하여 표시하는 대시보드를 구성함.
- ㉔ LoRa LPWAN 센서노드 구조 및 구현
- 센서 노드는 위와 같이 Raspberry Pi 3 보드를 사용하였고 운영체제는 데비안 리눅스를 수정한 라즈비안(Raspbian)의 최신 버전인 스트레치(Stretch) 버전과 그 직전 버전인 제시(Jessie) 릴리즈를 사용하였고 소프트웨어는 모두 C언어로 개발하였음.
  - 센서 노드는 크게 3개의 스레드(Thread)로 구성되어 있으며, 멀티 코어를 가진 Raspberry Pi 3를 활용하여 각 작업이 서로 지연 없이 동시에 처리하도록 설계함.

㉔ LoRa Network 및 Application 서버 구현

- 계측 Data 수신부는 시리얼 통신으로 데이터를 읽고 체크섬(Checksum)을 계산한 후 필요에 따라 소정의 버퍼에 데이터를 쌓는 구조임.
- 가속도 데이터는 계측 세션이 시작되면 200초 동안 x, y, z 축의 가속도 데이터를 모아서 처리하여 PSD 계산 및 압축부로 신호를 보냄. 이때 온도는 현재 20초마다 한번 씩 전송함.
- 계측 데이터 수신부에서 PSD계산 및 압축하여 모아둔 가속도 데이터가 200초 동안 수집되면 FFT가 실행되어 PSD를 구하며, FFT 가공 전의 가속도 데이터와 PSD 데이터는 모두 센서 노드의 내부 저장소에 파일 형태로 저장함.
- 최종 가공된 Data 전송을 위해 PSD 데이터는 ZIP 라이브러리를 통하여 압축되며 200초 동안 초당 50회(50Hz) 계측한 가속도 데이터는 총 120KB 정도임.(PSD Data는 약 60KB, 압축 후에는 약 57KB 임)
- 패킷 전송부에서 LoRa WAN 패킷은 일반적으로 수십 바이트에서 최대 200Byte 이므로 57KB 가량의 PSD 데이터 패킷량이 오버되기 때문에 패킷에 일련번호를 설정하여 많은 패킷으로 나뉘서 전송하도록 함.
- PSD 전송(20초 주기)의 온도 정보의 전송이 멈추는 것을 방지하기 위해, 우선순위를 두어 PSD 전송 중이라도 온도 데이터 패킷은 우선적으로 발송되도록 스케줄링 하였음.
- 데이터 손실을 막기 위해 모든 패킷은 네트워크서버에서 수신 확인(Confirm)을 하여야 다음 패킷이 전송되도록 하고, 수신 확인이 안 될 경우 Confirm이 될 때까지 재송신 하도록 구성함.

[PSD 계측 및 송신의 상세 방안].

- 리눅스 시그널의 기다림(1번인 SIGHUP)
- 초당 50번 200초간 가속도 데이터를 수신해서 버퍼에 저장
- 가속도 원본 데이터 파일로 저장
- 각 x, y, z 축 별로 FFT 수행
- 각 FFT 값에 대해  $1/(200 \times 50) * 2 \times \text{Abs(FFT)}^2$ 을 반영하여 PSD 변경
- PSD 값 파일로 저장
- 110바이트 씩 패킷 전송

㉕ 전송패킷구조

- LoRaWAN의 패킷은 약 100~200Byte이며 컴팩트한 구성을 위해 리틀 엔디안 바이너리(Banary)형식을 사용하였으며, 온도패킷과 PSD패킷에 대한 형식과 주요내용은 표 3.2~3.3과 같음.

<표 3.2> 온도 패킷의 형식 주요내용

| 이 름   | 형 식      | 내 용                                                                                   |
|-------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 노드 번호 | 16Bit 정수 | 각 센서 노드를 구분                                                                           |
| 타임스탬프 | 16Bit 정수 | 데이터 계측 시각에 해당하는 시간의 0~3599초 사이 값.<br>수신 쪽에서 현 시간을 구해서 년, 월, 일, 시간을 구해 넣음(공간을 줄이는 목적). |
| 온도    | 4Byte 실수 | 섭씨(℃) 온도                                                                              |

<표 3.3> PSD 패킷의 형식 주요내용

| 이 름                           | 형 식      | 내 용                                                                                      |
|-------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 노드 번호                         | 16Bit 정수 | 각 센서 노드를 구분                                                                              |
| 순서 번호                         | 2Byte 정수 | 패킷 일련 번호. 음수이면 마지막 패킷을 뜻함.                                                               |
| *타임스탬프<br>(순서번호가 0일<br>때만 존재) | 16Bit 정수 | 데이터 계측 시각에 해당하는 시간의 0~3599초 사이 값.<br>수신 쪽에서 현 시간을 구해서 년, 월, 일, 시간을 구해<br>넣음(공간을 줄이는 목적). |
| 압축된 PSD                       | Byte 열   | 패킷 길이가 LoRaWAN상에서 전달되므로 패킷 끝까지<br>PSD 정보임.                                               |

㉞ 데이터저장 방안

- 애플리케이션 서버는 자바(JAVA)로 작성되었고 단일 패킷으로 주기적으로 도착하는 온도 패킷과 여러 패킷으로 나뉘 들어오는 PSD 패킷을 전송받아 Elasticsearch로 저장하는 역할을 하며, Elasticsearch에는 JSON 형태로 Data가 수집되는데 아래와 같은 스키마(Schema)를 사용하였음.

[온도 정보]

```
{
  "nodeId": 1,      // 센서 노드 번호
  "@timestamp": "2017-11-14T00:48:05.028+09:00",  // 계측 시각
  "temperature": 26.3125 // 온도(섭씨)
}
```

[PSD 정보]

```
{
  "nodeId": 1, // 센서 노드 번호
  "@timestamp": "2017-11-14T17:36:34.115+09:00", // 계측 시각
  "x": 0.000019256988, // x축 PSD
  "y": 0.00003788191, // y축 PSD
  "z": 0.000020367235, // z축 PSD
  "freq": 0.005 // 주파수(한 계측에 대해 주파수 별로 이 항목을 기록)
}
```

㉟ LoRaWAN Gateway 및 LoRaWAN Network Server

- 센서노드에서 애플리케이션 서버로 수신한 패킷과 정보를 UDP로 전송하여 어플리케이션 서버에서 센서노드로 패킷 전송하도록 함.

㉞ Application Server

- 계측 데이터 수집, 분석, 센서 제어를 위한 서버임.

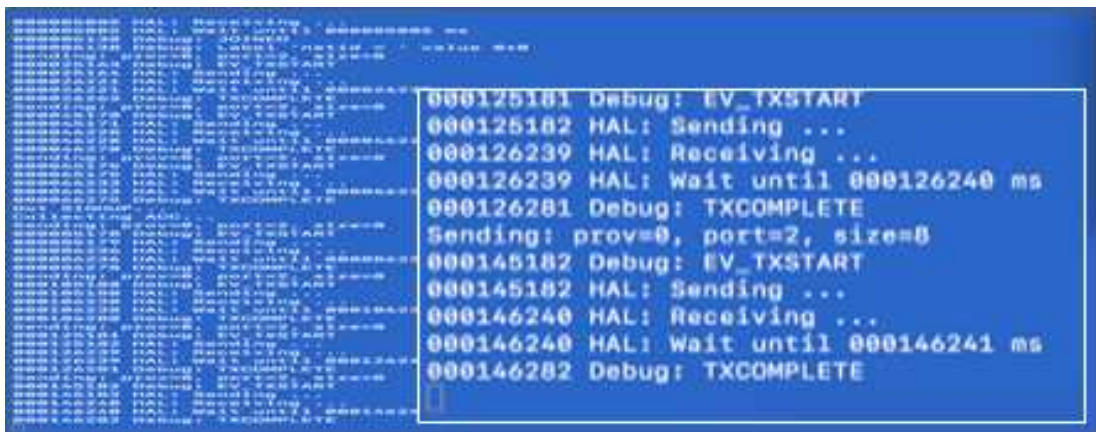
③ 연구3 : LoRa LPWAN 기반 무선 계측 시스템 실내 Lab Test

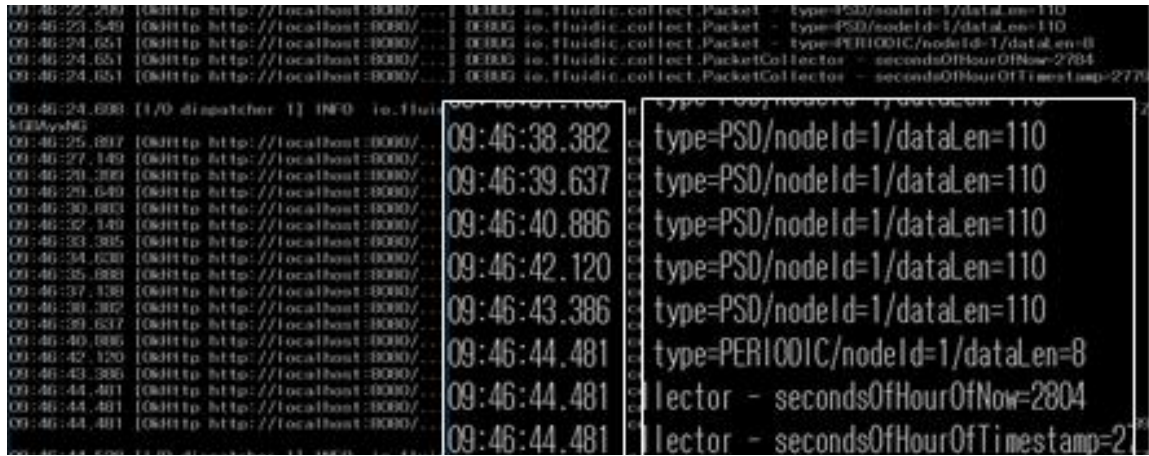
- ㉞ Raspberry Pi 3을 이용한 LoRa 기반 Prototype 통합센서보드에 탑재된 가속도센서에 대한 성능 및 무선 송수신에 Data 수집여부를 판단하기 위해 그림 3.9와 같이 실내 Lab Test를 수행함.



<그림 3.9> 실내 Lab Test 주요사진

- ㉞ 가속도 센서의 일정한 진동을 위해 소형 Plate Shaker 상부에 Prototype 통합센서를 상부에 올려놓고 무선 송수신 전송 및 수신여부를 파악하고 센서노드 및 게이트웨이 상태를 파악하기 위해 2대의 노트북을 이용하여 Lab Test를 수행
- ㉞ Lab Test 실험 결과는 그림 3.10과 같으며, 센서노드와 게이트웨이에서 Data 송수신이 정상적인 작동이 되고 있음을 확인하였으며, FFT 계측 Data를 PSD로 변환한 Data값은 그림 3.11과 같이 무선 Data 송수신이 가능한 것을 Graph를 통하여 확인함.





<그림 3.10> LoRa 센서노드 콘솔(위) 및 LoRa 게이트웨이 콘솔 데이터 취득(아래) 사진



<그림 3.11> LoRa LPWAN 기반 무선 계측 화면  
(가속도계 통한 PSD : Power Spectral Density)

## (2) 한국시설안전공단 (공동연구기관)

### ① 연구1 : 교량 무선계측센서 규격 표준화 가이드(안) 제시

#### ㉔ 연구배경 및 목적

- 최근 전 세계적으로 대형 토목 및 건축 구조물과 같은 사회기반시설(Infrastructure)에 대한 구조적 안정성 확보를 위해 장기적 또는 상시적 계측을 통한 유지관리 시스템 개발 및 적용하는 사례가 증가하고 있음.
- 대형 토목구조물 중에서 대표적인 사례인 교량의 상태를 항상 감시하여 교량의 이상 유무를 판단하는 것은 매우 중요한 일이며, 교량 등의 대형 구조물의 사고는 막대한 인명피해와 물질적인 손실이 발생하며 더 나아가 이런 사고들은 국민들의 정신 건강과 대외적인 국가의 이미지에도 심각한 피해를 줄 수 있음.
- 사고를 미연에 방지하고 시설물을 적절하게 관리함으로써 수명을 늘리고 시설물의 효율성을 높이기 위해서는 구조물 등에 대한 지속적인 감시와 안전성 평가가 반드시 필요함.
- 국내에는 중요 교량구조물에 유선 방식을 이용한 상시 감시 시스템을 구축, 운영하고 있으나, 계측방법을 통한 구조물의 안전성 분석은 설계 자료에 의해 설정된 구조 해석 모델을 통한 해석결과와 계측된 데이터 값의 단순 비교에만 의존하기 때문에

시스템에 대한 투자비용 대비 그 효과가 미흡한 것으로 판단되고 있는 상황임.

- 따라서 본 연구에서는 무선통신 센싱 기술을 응용한 구조물 감시 시스템의 개발의 기초자료로서 국내에 적용되어 있거나 적용을 위해 상용화 된 교량 무선계측시스템에 적용되는 계측기기에 대한 사양을 조사, 분석하여 최적화된 센서에 대한 규격을 표준화하고 가이드를 제시하여 기존 유선방식의 계측시스템에서는 얻을 수 없었던 경제적, 기술적인 장점들을 얻을 수 있을 것으로 기대됨.
- 또한 최적화된 센서 선정 가이드를 제시함으로써 무선통신 센싱 기술을 응용한 구조물 감시 시스템의 구축을 용이하게 만들고 비용, 공사기간, 유지 관리 등의 측면에서 많은 이득을 제공하여 건설 계측 분야에 아직 여명기인 무선통신 기술을 계측 유지관리 시스템에 적용하여 세계 시장을 선도할 수 있는 기회를 얻을 수 있을 것으로 기대됨.

㉞ 교량 유지관리계측시스템 현황조사 및 분석

- 국내·외 구축되어 있는 상시계측시스템은 대상 교량에 적합한 계측시스템을 설계하여 감시기를 설치하고 시공 중 초기값 산정 및 구조해석, 그리고 일정기간의 경향분석을 통하여 관리 한계값을 설정하여 사용 중에 있음.
- 장대교량을 포함한 특수교량에 대한 유지관리 계측시스템이 최근 국내에서 많이 구축되고 있으나 많은 부분을 외국기술 및 계측 기술자에 의존하고 있으며 가장 중요한 부분이라고 판단되는 구조물의 분석 및 안전성 평가 등의 기법이 아직까지 명확히 제시되지 않고 있는 실정임.

㉞ 무선계측센서 규격 표준화 가이드(안) 제시

[계측 센서의 선정 기본 방침]

- 계측센서는 계측목적, 계측기간, 계측 항목, 계측 대상, 계측 방법, 계측 환경 등을 고려하여 선정되어야 하며, 계측센서는 KS 또는 공인시험기관에서 이와 동등 이상의 품질인증이 된 제품을 사용하는 것을 원칙으로 함.
- 계측센서는 필요로 하는 자료의 계측범위, 분해능, 정확도(또는 정밀도), 기기특성, 현장조건 등을 고려하여 계측항목에 따라 적절한 것을 선정해야함.
- 계측센서는 매립형이나 외부 노출형을 사용하여야 하며, 매설형의 계측항목인 경우 수리가 불가능한 경우가 있으므로 기기 작동불량이나 고장에 대비하여 내구성이 보장되는 기기를 선택하여야함.
- 서로 다른 계측센서를 동일한 현장에 설치할 경우, 계측센서의 작동방식은 동일한 형식으로 선정하는 것을 원칙으로 하고, 사전 시험에 의해 성능시험 후 사용해야함.
- 계측센서는 계측목적에 적합한 정확도를 가져야 하고 최대 예상변화량 이상의 측정 범위를 가져야 하며, 계측자료의 정확성, 이용성, 경제성 등을 고려하여 다음과 같은 점들을 고려하여 계측기기를 선정해야함.
- 계측기기의 분해능, 정밀도, 반복 정밀도, 강도, 계측 범위 및 신뢰도가 계측 목적에 적합할 것.
- 작동 및 설치가 간단하고 설치 및 유지관리가 용이할 것.
- 예상 변위보다 계측기의 측정 기능범위가 클 것.
- 온도, 습도에 대해 영향을 적게 받고 보정이 간단할 것.
- 계기 오차 등을 유발 할 수 있는 계측기의 고장 발견이 용이할 것.
- 경제성이 있을 것.

## [계측센서의 사양(규격)]

### - 샘플링수

- 교량구조물은 동적특성 분석시 고유진동수가 통상 50Hz이하로 동적센서는 Sampling Rate은 100Hz이상을 표준으로 하고, 정적센서는 10분당 1sample을 표준으로 함.

### - 변형률계

- (설치목적) 교량 주요부재에 발생하는 변형률의 크기 변화를 계측하는데 사용할 수 있음.
- (적용범위) 설계시 구조해석 결과와 비교하고 싶은 경우 : 허용응력 대비 최대응력비가 가장 큰 위치에 설치(일반적인 경우에는 최대 정모멘트가 발생하는 위치) 활하중의 충격효과를 고려하고 싶은 경우 부재의 피로 상태를 평가하고 싶은 경우 : 활하중에 의한 응력 범위가 넓은 부재 및 그 위치에 설치현수교의 주 케이블 장력률 상태를 추정하기 위하여 주케이블 정착부의 Strand의 응력을 알고자 할 때 동적 활하중에 의한 변형률 계측을 위해서는 반드시 동적으로 측정할 수 있도록 구성해야 함.
- (측정방식) 전기저항식 방식을 사용함.
- (측정범위) 균열계의 측정범위는 적용 대상에 따라  $\pm 5000\mu\text{s}$  이상임.
- (분해능) 분해능은  $1\mu\text{s}$  이하일 것.
- (설정근거) 변형률센서는 노이즈 영향이 가장 많은 센서 중 하나로서 높은 수준의 분해능을 가진 센서를 권장하며, 콘크리트용은 지그형 영구변형률계, 강재용은 포일 게이지형 영구 변형률계를 권장함.

### - 경사계

- (설치목적) 경사계는 대상 구조물의 경사 편향각을 측정하여 기울기 변화(변위)에 따른 안정성을 판단하는데 적용함.
- (적용범위) 교량의 주탑에 적용가능.
- (측정방식) 경사계의 측정방식은 전기저항식 방식 외 동등이상의 방식을 이용함.
- (측정범위) 구조물 경사계의 측정범위는  $\pm 8000\mu\text{radian}$  이상 또는 구조물에 따라  $\pm 0.5, \pm 3, \pm 4$  degree 중 측정항목에 적합한 측정범위의 센서를 선정하여 사용함.
- (분해능) 분해능은  $1\mu\text{radian}$  이하이어야 함.
- (설정근거) 주탑에 경사의 특성상 계절적 영향에 민감하여 실시간 변형에 대한 유효한 데이터 제공이 어려운 구조적 특성이 있으므로, 실시간 모니터링을 위해서는 높은 수준의 분해능을 가진 센서 설치를 권장함.

### - 온도계

- (설치목적) 온도계는 계측기기가 설치된 현장의 계측기 주변온도를 계측하여 상호 비교에 의한 데이터 수집을 위해 적용하며, 설치 현장의 대기 온도를 측정하는데 적용함.
- (적용범위) 설치현장의 계측기 주변의 온도 측정 및 구조물의 내부온도 계측.
- (측정방식) 본 가이드라인에서는 전자식 온도계에만 한정해서 적용.
- (측정범위) 온도계의 측정범위는  $-50^{\circ}\sim +100^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 만족하여야 하며, 온도계의 최소 측정 단위는  $0.1^{\circ}\text{C}$  이하.

- 신축변위계
  - (설치목적) 신축변위계는 신축이음부의 거동을 측정하여 변위에 따른 안정성을 판단 하는데 적용함.
  - (적용범위) 교량의 신축이음부.
  - (측정방식) 신축변위계는 설계서상의 교량의 신축변위량을 충분히 측정할 수 있는 와이어식 Potentiometer를 적용.
  - (측정범위) 신축이음계의 측정범위는 적용 대상 교량의 설계시 산정한 신축이음량 이상.
  - (정확도) 정확도는  $\pm 0.28\%$  to  $\pm 0.12\%$  FS 이내.
  - (설정근거) 신축변위계는 장기적인 계측 수행을 통한 경험적 관점에서 와이어식 방식이 가장 경제적이고 안정적인 동적데이터 확보가 가능한 것으로 이를 권장함.
- 풍향풍속계
  - (설치목적) : 풍향풍속계는 교량에 작용하는 외부 하중인 풍하중을 측정하기 위하여 사용되며, 적용 교량 인근의 실제 풍향과 풍속을 특정하기 위해 사용함.
  - (적용범위) 주탑 상부, 상판 최대 경간의 중앙단면에 적용하며, 별다른 적용 범위에 대한 언급이 없는 경우 적용 교량에 작용하는 풍향 및 풍속을 대표할 수 있는 위치에 설치되어야함.
  - (측정방식) 기계식 또는 초음파식 풍향풍속계 적용.
  - (측정범위) 풍속은  $0 \sim 65\text{m/s}$  이상, 풍향은  $0 \sim 359^\circ$ 이어야 함.
  - (설정근거) 풍향풍속계의 경우는 기계식과 초음파식이 있으며, 기계식은 내구수명이 작고, 초음파식은 비를 동반한 바람에 대하여 데이터가 외곡이 되는 경우가 발생되어 2개의 센서를 동시에 설치하는 것을 표준으로 함.
- 케이블 장력계
  - (설치목적) 케이블의 진동 측정 및 진동으로부터 장력을 산출하기 위하여 사용함.
  - (적용범위) 교량에 설치된 케이블에 적용.
  - (측정용량) 측정용량은  $\pm 4\text{g}$  이상.
  - (측정범위) 측정범위는  $0 \sim 250\text{Hz}$
  - (설정근거) 케이블 장력계는 통상적인 사장교, 현수교의 케이블에서는 측정용량을  $\pm 2\text{g}$ 로 가능하나, 케이블의 진동이 심한 경우  $3\text{g}$ 를 초과하는 경우가 발생되므로  $\pm 4\text{g}$  이상을 표준으로 설정.
- 보강거더 가속도계
  - (설치목적) 보강거더의 진동 측정 및 진동으로부터 고유진동수, 감쇠특성 등 분석.
  - (적용범위) 보강거더 1/2지점 및 1/4지점부에 연직 및 교직방향 가속도계 적용.
  - (측정용량) 측정용량은  $\pm 2\text{g}$  이상.
  - (측정범위) 측정범위는  $0 \sim 250\text{Hz}$
  - (설정근거) 통상적인 사장교, 현수교의 보강거더의 연직 및 교직방향 가속도 성분의 경우 통상  $2\text{g}$  이내로 거동하여 이를 표준으로 설정.

## [계측센서의 설치 표준]

- 정적변형률계
  - 정적변형률계의 설치방법 및 주요내용은 아래의 표 3.4와 같음.

<표 3.4> 정적변형률계 설치순서 및 설치내용

| 구 분 | 설 치 순 서                 | 설치내용                                                                                                                 |
|-----|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 사용자재                    | - 당일 반입자재 확인 및 검수(감독/감리/계측담당)<br>· 검교정 성적서                                                                           |
| 2   | 설치위치 선정                 | - 정적 변형률계 설치위치 확인<br>- 설치위치에 표시(락카/분필 마킹) : 변색 주의                                                                    |
| 3   | 설치면 고르기                 | -그라인더나 기타 장비로 설치면 정리 : 도막층 손상 최소화                                                                                    |
| 4   | 설치면에<br>센서 고정용<br>지그 고정 | - 설치면에 칼브릭 고정<br>- 센서 고정용 지그 설치 : 고정시 수평, 수직 확인<br>(수계이용)                                                            |
| 5   | 센서 설치                   | - 센서 고정용 지그에 변형률계 고정.<br>· 센서 고정시 지그와 게이지 면 에폭시로 밀착.<br>· 센서 고정시 충격이 가해지지 않도록 주의하여 설치.<br>· 센서의 축방향 확인.<br>- 도막층 복구. |
| 6   | 케이블링                    | - 센서 연장케이블 데이터로거까지 케이블링(섀드케이블까지 연결)<br>- 케이블링시 보호관을 미리 설치하여 케이블 보호                                                   |
| 7   | 초기치 설정                  | - 초기치 설정 (케이블링 후 최소 한 시간 이상 경과 후)<br>· 센서가 안정된 상태 확인 후 초기치 설정                                                        |

- 경사계

· 경사계의 설치방법 및 주요내용은 아래의 표 3.5와 같음.

<표 3.5> 경사계 설치순서 및 설치내용

| 구 분 | 설 치 순 서      | 설치내용                                                                                                                                  |
|-----|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 사용자재         | - 당일 반입자재 확인 및 검수(감독/감리/계측담당)<br>· 검교정 성적서                                                                                            |
| 2   | 설치위치 선정      | - 경사계 설치위치 확인<br>- 설치위치에 표시(락카/분필 마킹) : 변색 주의                                                                                         |
| 3   | 설치면 고르기      | - 설치면에 그라인더나 기타 장비로 면을 고르게 함.<br>· 도막층 손상 최소화<br>- 콘크리트면은 바닥면에 앵커용 볼트를 시공                                                             |
| 4   | 설치면에<br>센서고정 | - Steel Plate를 앵커링하여 고정<br>- Plate위에 놓여질 센서의 방향을 결정<br>- Mounting Stude를 Plate에 고정.                                                   |
| 5   | 센서 설치        | - Tiltmeter 센서를 적절한 수평이 유지되도록 거치<br>- 센서 고정시 Steel Plate와 면을 에폭시로 밀착<br>- 센서 고정시 충격이 가해지지 않도록 주의하여 설치                                 |
| 6   | 케이블링         | - 센서 설치가 완료되면 연장케이블을 데이터로거까지 케이블링.<br>- 케이블링시 보호관을 미리 설치하여 케이블 보호                                                                     |
| 7   | 초기치 설정       | - Tiltmeter 센서의 Connector를 수동계측기(Model 771)에 연결하고 Mounting Stude의 너트를 이용 초기치를 설정.<br>- 수동계측기 값과 데이터로거에서 측정되는 값 비교하여 센서의 정상적인 작동여부 확인. |

- 온도계
- 온도계의 설치방법 및 주요내용은 아래의 표 3.6과 같음

<표 3.6> 온도계 설치순서 및 설치내용

| 구 분 | 설 치 순 서     | 설치내용                                                                                                      |
|-----|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 사용자재        | - 당일 반입자재 확인 및 검수(감독/감리/계측담당)<br>· 검교정 성적서                                                                |
| 2   | 설치위치 선정     | - 온도계 설치위치 확인<br>- 설치위치에 표시(락카/분필 마킹)                                                                     |
| 3   | 설치면 고르기     | - 그라인더나 기타 장비로 설치면 정리                                                                                     |
| 4   | 설치면에 온도계 고정 | - 온도계를 설치위치에 고정                                                                                           |
| 5   | 케이블링        | - 센서 연장케이블을 데이터로거까지 케이블링<br>- 케이블링시 보호관을 미리 설치하여 케이블 보호                                                   |
| 6   | 초기치 설정      | - 초기치 설정 (케이블링 후 최소 한 시간 이상 경과 후)<br>· 센서가 안정된 상태 확인 후 초기치 설정<br>- 데이터로거와 수동계측기로 측정된 값을 비교하여 정상적인 작동여부 확인 |

- 신축변위계
- 신축변위계의 설치방법 및 주요내용은 아래의 표 3.7과 같음.

<표 3.7> 신축변위계 설치순서 및 설치내용

| 구 분 | 설 치 순 서    | 설치내용                                                                                                                                                                               |
|-----|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 사용자재       | - 당일 반입자재 확인 및 검수(감독/감리/계측담당)<br>· 검교정 성적서                                                                                                                                         |
| 2   | 설치위치 선정    | - 신축변위계 설치위치 확인<br>- 설치위치에 표시(락카/분필 마킹) : 변색 주의                                                                                                                                    |
| 3   | 설치면 고르기    | - 설치면을 그라인더나 기타 장비로 면을 고르게 함.<br>· 도막층 손상 최소화<br>- 콘크리트면은 바닥면에 앵커용 볼트를 시공.                                                                                                         |
| 4   | 설치면에 센서 고정 | - 설치면에 Mounting Plate를 점 용접/앵커로 고정.<br>- 고정시킨 Mounting Plate에 센서를 고정.<br>- 수평, 수직이 맞도록 함. (수평계 이용)                                                                                 |
| 5   | 센서 설치      | - 센서 고정용 지그에 신축변위계 고정.<br>· 센서 고정시 지그와 게이지면 예폭시로 밀착<br>- 센서 고정시 충격이 가해지지 않도록 주의하여 설치.<br>· 센서의 축방향과 정확히 맞춤.<br>- 센서 고정시 측정범위가 $\pm 1000\text{mm}$ 가 되도록 고정<br>- 와이어 및 센서를 보호관으로 고정 |
| 6   | 케이블링       | - 센서 설치가 완료되면 연장케이블을 데이터로거까지 케이블링<br>- 케이블링시 보호관을 미리 설치하여 케이블 보호                                                                                                                   |
| 7   | 초기치 설정     | - 케이블링이 끝나면 최소 한 시간 이상 경과 후 센서가 안정된 상태를 확인 후 초기치 설정                                                                                                                                |

- 풍향풍속계
- 풍향풍속계의 설치방법 및 주요내용은 아래의 표 3.8과 같음.

<표 3.8> 풍향풍속계 설치순서 및 설치내용

| 구 분 | 설 치 순 서                 | 설치내용                                                                                                                                            |
|-----|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 사용자재                    | - 당일 반입자재 확인 및 검수(감독/감리/계측담당)<br>· 검교정 성적서                                                                                                      |
| 2   | 설치위치 선정                 | - 풍향풍속계 설치위치 확인<br>- 설치위치에 표시(락카/분필 마킹) : 변색 주의                                                                                                 |
| 3   | 설치면 고르기                 | - 그라인더나 기타 장비로 설치면 정리 : 도막층 손상 최소화                                                                                                              |
| 4   | 설치면에 센서 고정용 지그 및 설치대 고정 | - 센서 고정용 Jig를 설치<br>- 센서고정용 지그에 풍향풍속계를 설치 폴대 고정 (폴대의 높이는 유지관리를 고려하여 2.5m로 하며, 스테인레스 스틸 재질 및 용융도금을 사용할 수 있음)<br>- 지그 및 설치대 고정시 수평, 수직 확인(수평계 이용) |
| 5   | 센서 설치                   | - 센서 고정용 지그 및 기둥에 풍향풍속계 고정<br>· 센서 고정시 충격이 가해지지 않도록 주의하여 설치                                                                                     |
| 6   | 케이블링                    | - 센서 연장케이블을 데이터로거까지 케이블링<br>- 케이블링시 보호관을 미리 설치하여 케이블 보호                                                                                         |
| 7   | 초기치 설정                  | - 초기치 설정 (케이블링 후 최소 한시간 이상 경과 후)<br>· 센서가 안정된 상태 확인 후 초기치 설정<br>- 센서단 측정치와 데이터 로거 측정치를 비교하여 센서 정상 작동여부 확인                                       |

- 케이블 장력계
- 케이블 장력계의 설치방법 및 주요내용은 아래의 표 3.9와 같음.

<표 3.9> 케이블 장력계 설치순서 및 설치내용

| 구 분 | 설 치 순 서  | 설치내용                                                                                                            |
|-----|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 사용자재     | - 당일 반입자재 확인 및 검수 : 검교정 성적서                                                                                     |
| 2   | 설치위치 선정  | - 케이블 장력계 설치위치 확인.<br>- 설치위치에 표시(락카/분필 마킹).                                                                     |
| 3   | 센서 지그 설치 | - 센서 고정용 지그 설치.<br>- 지그 설치시 케이블과 수평 수직이 맞도록 함.                                                                  |
| 4   | 센서 설치    | - 센서 고정용 지그에 케이블 장력계 고정<br>- 센서 설치시 충격이 가해지지 않도록 주의하여 설치                                                        |
| 5   | 케이블링     | - 케이블은 설치전 Cable tester로 이상 유무 확인.<br>- 센서 설치가 완료되면 연장케이블은 데이터로거까지 케이블링.<br>- 케이블의 양끝은 번호를 표시하여 유지관리가 용이 하도록 함. |
| 6   | 초기치 설정   | - 케이블링이 끝나면 최소 한시간 이상 경과 후 센서의 안정된 상태를 확인 후 초기치 설정<br>- 센서 초입부 측정치와 데이터로거부에서 센서값을 비교 하여 정상작동 여부 확인              |

## [계측센서의 유지관리]

- 계측기기의 보정 방법
  - 계측기기는 설치 전 및 설치 직후에 작동성을 검사하고, 필요시 보정해야함.
  - 계측수행 중 계측치가 특이하게 변화되는 경우, 계측기의 이상 유무를 확인하고, 필요시 보정하여야함.
- 계측기기의 보호
  - 설치된 계측기기 주변은 계측기기 관리 및 계측수행을 위하여 날씨 및 동식물의 생육으로 인한 악영향을 받지 않도록 충분한 보호조치를 취하여야 함..
- 계측기기의 관리
  - 계측기기는 성능보존 및 계측결과의 신뢰성 확보를 위하여 제작사가 제시한 방법과 절차에 따라 관리하여야 함.
  - 설치된 계측기 주변은 계측기기 관리 및 계측수행을 위하여 날씨 및 동식물의 생육으로 인한 악영향을 받지 않도록 충분한 보호조치를 취하여야 하며, 계측명, 위치, 초기측정일자과 초기측정값이 기록된 표시판을 설치하여 관리하여야 함.
  - 날씨 및 동식물의 생육 또는 기타의 이유로 계측기가 손상되었을 경우에는 손상 계측기 인접부에 계측기를 재설치한 후 계측을 계속 수행하여야 함.

## 나. 2차년도 세부 연구내용 및 결과

### (1) 동일기술공사(주관연구기관)

#### ① 연구1 : LoRa LPWAN 기반 무선 DAQ board(스마트센서노드) 개발

##### ㉠ 개 요

- 1차년도에 개발된 MEMS 기반 멀티 센서 보드 및 외부 계측기 신호를 수집하고 처리하여 FFT(Fast Fourier Transform), PSD(Power Spectral Density) 등의 Data Processing 분산처리가 가능하고, 한국 LoRa 프로토콜 표준인 KR920-923 규격에 의해 데이터를 송수신할 수 있으며, 실제 사장교, 현수교 등의 케이블 장력 측정에 적용이 가능한 LoRa LPWAN 기반 스마트센서노드를 개발하는 것을 목적으로 함.

##### ㉡ 시작품 제작 주요 내용

- 1차년도에 개발된 Raspberry Pi 3 기반으로 구현된 센서노드 및 게이트웨이는 그림 3.12와 같이 산업용기준(Industrial Specification)으로 제작된 보드가 아니며, 큰 외기 온도 변화, 강우, 진동 등이 있는 실제 교량 현장적용을 위하여 이런 환경 요인들을 극복할 수 있는 산업용 기준을 적용한 디바이스 모듈 채용 및 이런 환경 요소를 고려한 하드웨어의 설계/제작이 필요.
- 1차년도 사용했던 쉴드(shield) 형태의 LoRa 모듈을 대신하여, Lierda LW923-E1 LoRa 모듈을 온보드(On board)화 시스템 집적도(Integrity) 향상
- 고성능, 고내구성 CPU 및 메모리 채용으로 케이블 장력 자동 계산 등의 분산처리 가능.



- Onboard LoRa module
- KR920-923 type, Lierda LW923-E1
- Power : 상시전원/Battery 동작가능
- CPU : Texas Instrument AM3358(1GHz)
- Memory : 1.5 GB
- Storage : Micro SD slot
- External IO : UART, GPIO
- OS : Linux 기반
- 고내구성 Industrial Spec.

<그림 3.12> LoRa 스마트센서노드(DAQ) 시작품 제작 및 성능 제원

## ② 연구2 : 교량 케이블 장력 무선 계측시스템 개발

### ㉠ 개 요

- LoRa 기반 무선 네트워크를 통한 교량 무선 유지관리 시스템 구현을 위해, 케이블 가속도 데이터 수집, 저장, 분석(FFT, PSD)처리 및 LoRa 송수신이 가능한 LoRa 기반 스마트센서노드, LoRa 네트워크/어플리케이션 서버, 게이트웨이로 구성된 LoRa 기반 센서네트워크를 그림3.14~3.17과 같이 제작하였으며 여수 돌산대교, 전주천교 등의 실교량에 대한 Pilot Test 적용 및 데이터 분석 수행함.

### ㉡ 시작품 제작 주요 내용

- 1차년도 기 개발된 통합센서보드와 2차년도 개발된 LoRa 스마트센서노드를 UART 통한 인터페이스하여 케이블 장력계 구현함.
- LoRa 스마트센서노드는 통합센서보드의 3축 가속도계의 샘플링레이트(Sampling Rate)와 계측시간(duration)를 제어하며, 샘플링 rate의 경우 50Hz 와 100Hz, 계측시간의 경우 5분 계측, 10분 계측을 선택할 수 있으며, 계측 후 자동으로 FFT 처리하며, 계측 데이터 검증을 위해 원시데이터는 내장된 외부 저장 장치인 sd-card 에 저장함.



<그림 3.13> MEMS 기반 통합센서보드



<그림 3.14> 멀티센서보드 / 스마트센서노드 인터페이스



<그림 3.15> 센서보드/스마트센서노드/ 배터리/하우징



<그림 3.16> LoRa 게이트웨이 (여수 돌산대교)

### ③ 연구3 : 네트워크 서버 및 Web 기반 모니터링 서버 개발

#### ㉓ 개 요

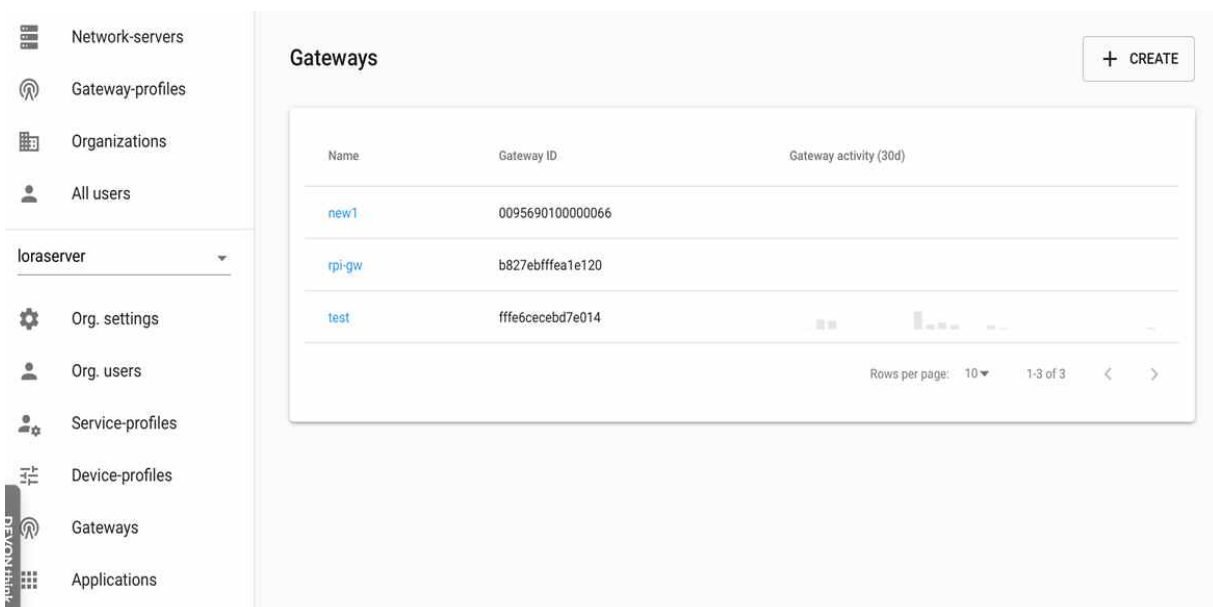
- LoRa LPWAN기반 스마트센서노드와의 센서네트워크 구축을 위해 LoRa Class A/C 송수신을 구현하였으며, 플랫폼 구축을 위해 오픈소스 기반으로 LoRa Gateway Bridge, LoRa Network Server, LoRa Application Server, Web 기반 App 서버를 구현하는 것을 목적으로 함.

#### ㉔ 서버구현 주요내용

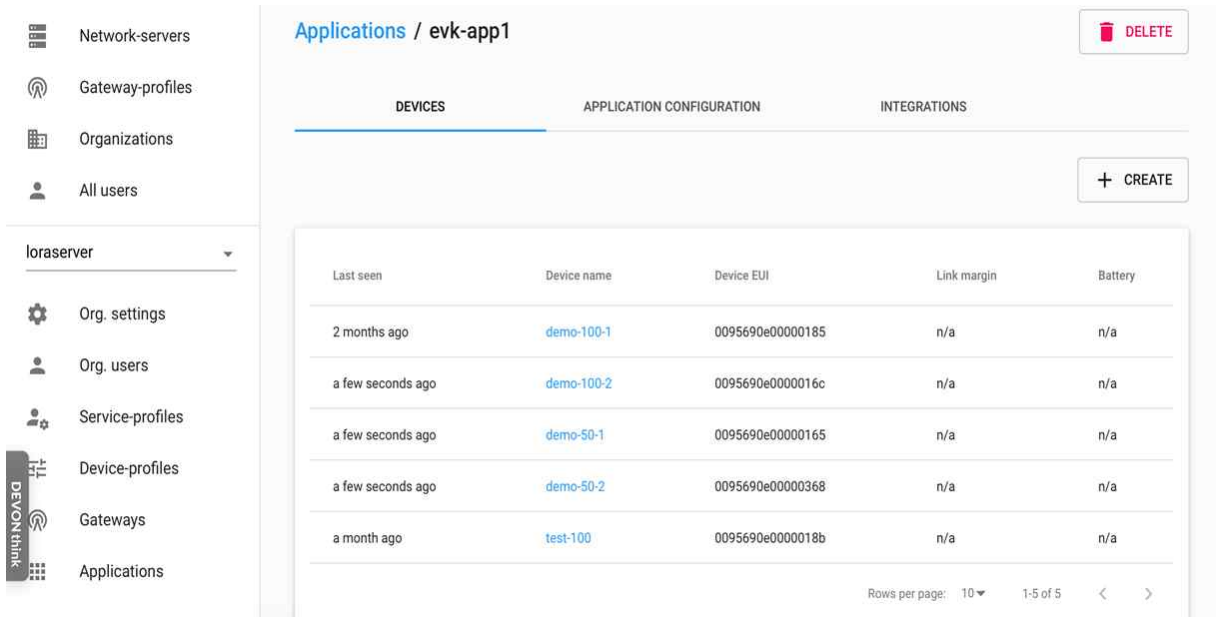
- LoRa Gateway Bridge : 게이트웨이상의 packet-forwarder를 통해 수신된 UDP Protocol을 JSON으로 변환하여 LoRa Server로 전달하도록 함.
- LoRa Server : 수신된 패킷의 중복 관리, LoRaWAN mac-layer 와 다운링크 데이터 송신에 대한 일정관리.
- LoRa Application Server : 단말의 가입요청(Join Request), 패킷의 암호화 처리 등을 담당하며, 웹 환경을 통해, 단말, 게이트웨이, 어플리케이션 등을 관리.
- Monitoring Server : 수신된 데이터 모니터링 적용.
- PostgreSQL 기반 데이터베이스 적용.
- 그림 3.17처럼 콘솔을 통해서 구축된 LoRa 네트워크 및 어플리케이션 서버의 각 서버모듈의 동작을 확인하였음.

```
loraserver_1 | time="2018-11-25T01:16:33Z" level=info msg="device-session saved" dev_addr=00942a0e dev_eui=0095690e00000368
gatewaybridge_1 | time="2018-11-25T01:16:33Z" level=info msg="gateway: received udp packet from gateway" addr="172.25.0.1:36580" protocol_version=2 type=TXACK
gatewaybridge_1 | time="2018-11-25T01:16:33Z" level=info msg="backend: publishing packet" qos=0 topic=gateway/fffe6cecebd7e014/ack
gatewaybridge_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="gateway: received udp packet from gateway" addr="172.25.0.1:36580" protocol_versions=2 type=PushData
gatewaybridge_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="gateway: rxpk packet received" addr="172.25.0.1:36580" data=gA4qLACA1AAKzpgETuled1fXaAeBueVDe2j mac=fffe6cecebd7e014
gatewaybridge_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="backend: publishing packet" qos=0 topic=gateway/fffe6cecebd7e014/rx
gatewaybridge_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="gateway: sending udp packet to gateway" addr="172.25.0.1:36580" protocol_version=2 type=PushACK
loraserver_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="backend/gateway: rx packet received"
loraserver_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="rx info sent to network-controller" dev_eui=0095690e00000368
loraserver_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="device-session saved" dev_addr=00942a0e dev_eui=0095690e00000368
appserver_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="device updated" dev_eui=0095690e00000368
appserver_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="handler/mqtt: publishing message" qos=0 topic=application/13/device/0095690e00000368/rx
appserver_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="finished unary call with code OK" grpc.code=OK grpc.method=HandleUplinkData grpc.request.deadline="2018-11-25T01:16:35Z" grpc.service=as.ApplicationServerService grpc.start_time="2018-11-25T01:16:34Z" grpc.time_ms=29.218 peer.address="172.25.0.7:54728" span.kind=server system=grpc
loraserver_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="finished client unary call" grpc.code=OK grpc.method=HandleUplinkData grpc.service=as.ApplicationServerService g
rpc.time_ms=31.291 span.kind=client system=grpc
loraserver_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="backend/gateway: publishing tx packet" qos=0 topic=gateway/fffe6cecebd7e014/tx
gatewaybridge_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="backend: downlink packet received" topic=gateway/fffe6cecebd7e014/tx
gatewaybridge_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="gateway: sending udp packet to gateway" addr="172.25.0.1:36580" protocol_version=2 type=PullResp
loraserver_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="device-session saved" dev_addr=00942a0e dev_eui=0095690e00000368
gatewaybridge_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="gateway: received udp packet from gateway" addr="172.25.0.1:36580" protocol_version=2 type=TXACK
gatewaybridge_1 | time="2018-11-25T01:16:34Z" level=info msg="backend: publishing packet" qos=0 topic=gateway/fffe6cecebd7e014/ack
```

<그림 3.17> LoRa Server Gateway Console



<그림 3.18> LoRa Server 게이트웨이 관리



<그림 3.19> LoRa Server 단말 관리



<그림 3.20> LoRa Server Packet Example

#### ④ 연구4 : 실교량 Pilot Test를 통한 교량 장력 계측 검증

##### ㉠ 개 요

- LoRa 기반 무선계측시스템 개발과 관련하여 한국시설안전공단에서 운영관리중인 전주천교와 여수 돌산대교에 시범설치를 하여 기존 유선센서와 계측 Data 비교 검증 연구를 수행함.
- 일시 : 2018.10.29. ~ 2018.10.30
- 장소 : 여수 돌산대교

#### ㉞ Pilot Test주요내용

- 본 과제를 통해 개발된 LoRa 기반 무선 계측시스템과 유선 계측시스템을 비교하기 위하여 그림 3.21과 같이 동일한 케이블에 유·무선 계측기를 설치하고 100Hz 샘플링으로 10분간 가속도 계측하여 Multi Vibration Mode 방법으로 케이블장력을 추정함.



(a) 무선 계측기 / 유선 계측기 동시 설치



(b) 유선 계측기 데이터 로거



(c) 게이트웨이 설치 및 LoRa 서버 셋업

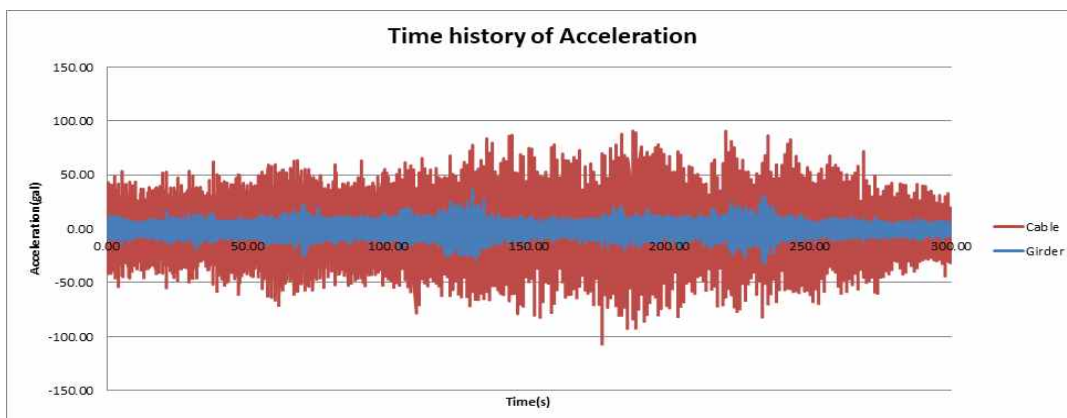


(d) 유선 계측기 데이터로거 통한 데이터 수집

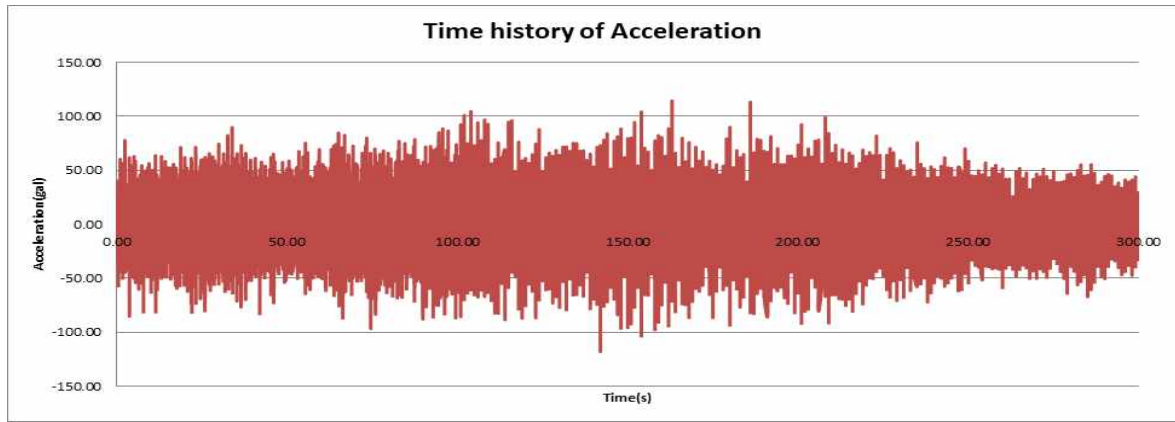
<그림 3.21> 돌산대교 Test Bed 실험사진

#### ㉞ Pilot Test결과

- 여수 돌산대교 케이블의 설치한 가속도계의 z축 가속도 결과(Raw data)는 그림 3.22~3.23으로 수신 Data를 이용하여 PSD(Power Spectral Density) 분석하였으며, 기존 유선계측 센서와 개발된 무선 계측센서와의 PSD 분석 결과(그림 3.24~3.25)를 통해 표 3.10과 같이 케이블의 모드별 고유주파수를 산정하여 비교 분석하였음.

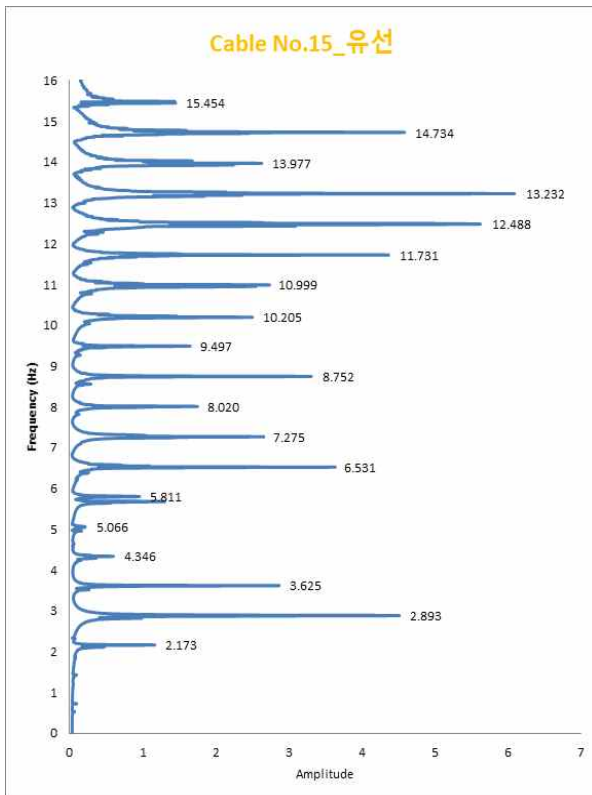


<그림 3.22> 유선센서 가속도 Raw Data

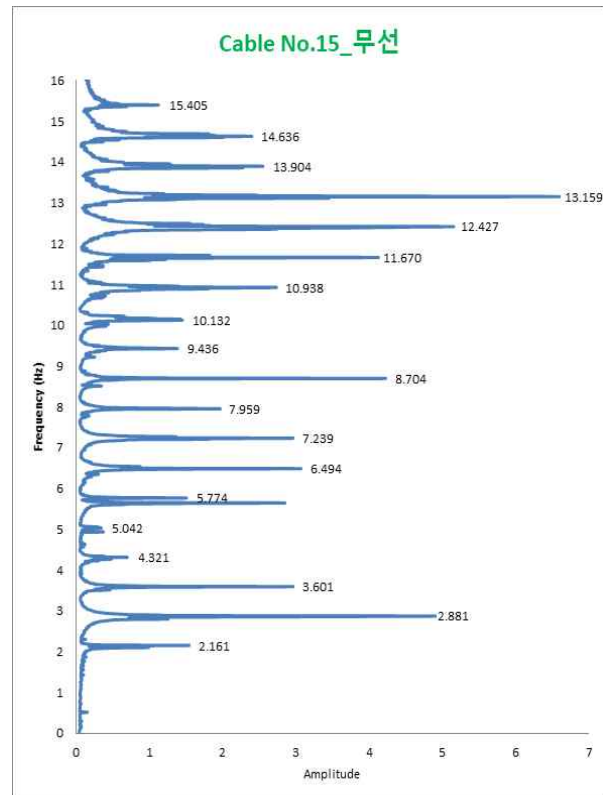


<그림 3.23> LoRa 기반 무선 센서 가속도 raw data

· PSD(Power Spectral Density) 분석을 통한 고유주파수



<그림 3.24> 유선 3축가속도계 고유주파수



<그림 3.25> 무선 3축가속도계 고유주파수

㉠ 모드별 고유 주파수

<표 3.10> Mode별 유/무선 고유 주파수 결과

| Mode | Natural Frequency |       | 오차    | 오차율(%) |
|------|-------------------|-------|-------|--------|
|      | 유선                | 무선    |       |        |
| 1*   | —                 | —     | —     | —      |
| 2*   | —                 | —     | —     | —      |
| 3    | 2.173             | 2.161 | 0.012 | 0.552  |
| 4    | 2.893             | 2.881 | 0.012 | 0.415  |
| 5    | 3.625             | 3.601 | 0.024 | 0.662  |
| 6    | 4.346             | 4.321 | 0.025 | 0.575  |

|    |        |        |       |       |
|----|--------|--------|-------|-------|
| 7  | 5.066  | 5.042  | 0.024 | 0.474 |
| 8  | 5.811  | 5.774  | 0.037 | 0.637 |
| 9  | 6.531  | 6.494  | 0.037 | 0.567 |
| 10 | 7.275  | 7.239  | 0.036 | 0.495 |
| 11 | 8.020  | 7.959  | 0.061 | 0.761 |
| 12 | 8.752  | 8.704  | 0.048 | 0.548 |
| 13 | 9.497  | 9.436  | 0.061 | 0.642 |
| 14 | 10.205 | 10.132 | 0.073 | 0.715 |
| 15 | 10.999 | 10.938 | 0.061 | 0.555 |
| 16 | 11.731 | 11.670 | 0.061 | 0.520 |
| 17 | 12.488 | 12.427 | 0.061 | 0.488 |
| 18 | 13.232 | 13.159 | 0.073 | 0.552 |
| 19 | 13.977 | 13.904 | 0.073 | 0.522 |
| 20 | 14.734 | 14.636 | 0.098 | 0.665 |
| 21 | 15.454 | 15.405 | 0.049 | 0.317 |

\* 제1,2모드 고유진동수는 유, 무선 센서 모두 추출되지 않았음

- 위와 같은 결과를 바탕으로 Multi Vibration Mode에 의한 케이블장력 산정 결과는 표 3.11과 같으며, 유선센서와 개발된 무선센서와의 오차율은 약 1.177%로 기존 유선센서와 거의 동일한 값을 도출하였음.

<표 3.11> 유선/무선 센서의 케이블장력 산정 결과 및 비교

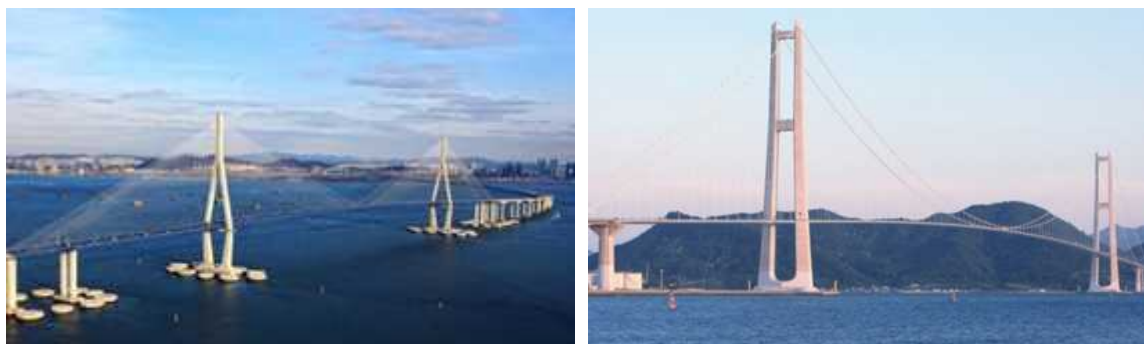
| 유선(kN)    | 무선(kN)    | 오차(kN) | 오차율(%) |
|-----------|-----------|--------|--------|
| 1,746.262 | 1,725.713 | 20.549 | 1.177  |

## (2) 한국시설안전공단(공동연구기관)

### ① 연구1 : 교량 무선계측시스템 관리기준치 설정 가이드(안) 제시

#### ㉔ 연구배경 및 목적

- 콘크리트, 강재, 케이블 등에 대한 고강도 재료의 개발, 컴퓨팅 성능향상에 따른 복잡한 구조형상에 대한 해석기술 발전 및 해석 속도 증가, 글로벌 시장에서 세계 최장의 교량(최대지간장 3,000m 이상)들이 설계·시공되고 있는 추세이며, 이러한 첨단 과학기술의 발전에 따라 건설되는 초장대 교량은 급속히 증가되고 있고, 그림 3.26과 같이 국내에서도 최장 사장교 인천대교(최대지간장 800m), 최장 현수교 이순신대교(최대지간장 1,545m) 등을 비롯하여 많은 특수교량이 건설되었음.



<그림 3.26> 인천대교(좌), 이순신대교(우)

- 상기와 같은 특수교량은 재해·재난 최소화 목적뿐만 아니라 구조적 세장함에 따른 바람의 영향 및 동적 활하중에 의한 영향 등으로 안전성 및 사용성 확보를 위해 상시 모니터링을 수행할 필요성이 있음.
- 국내에서는 대표적으로 한강상 교량의 상시 계측시스템(서울시)과 국도 특수교량에 대한 상시 계측시스템(국토교통부)이 있으며, 그 외에도 지자체 및 공공 관리주체 등에서 독자적인 상시 계측시스템을 구축·운영하고 있음 관리주체별, 계측시스템 개발자 또는 관리 엔지니어에 따라 상시 계측에 대한 관리기준도 상이하며, 이에 대한 표준화도 중요하나 합리적 관리기준 설정 방안에 대한 연구가 선행되어야 함.
- 교량구조물은 장기간 공용시 환경변화, 하중특성변화 등 다양한 외부조건들에 의해 초기상태와는 다른 구조 상태로 변화되므로, 교량 유지관리 시 외부조건 특성이 주기적으로 반영될 수 있도록 합리적인 관리기준치가 필요함.
- 또한, 구조해석 및 관련 설계기준 등에 의해 초기 설정된 관리기준치는 공용 중인 교량의 합리적인 유지관리를 위하여 계측된 데이터의 분석결과를 바탕으로 주기적으로 수정 및 변경하여 적용할 필요가 있음.
- 즉, 장기간 공용중인 교량의 실제 거동을 합리적으로 유지관리하기 위해 현재의 구조상태를 합리적으로 관리할 수 있는 관리기준치의 재설정이 필요함.
- 상기에 따라, 본 연구의 목적은 교량 상시 계측시스템에 있어, 관리주체별/계측시스템 개발자/관리 엔지니어 등에 따라 상이하게 설정·운영되고 있는 계측 관리기준치에 대한 합리적 설정 방안(가이드)을 제시하는 것이 목적이며, 주요 연구내용은 다음과 같음.
  - 교량 계측 관리기준치 설정현황
  - 교량 계측 관리기준치 설정방법 분석
  - 계측 관리 항목별 문제점 도출
  - 관리기준치 설정관련 전반적 효율화 방안
  - 항목별 관리기준치 설정 방안
  - 교량 상시 안전관리 계측시스템 관리기준치 설정 가이드(안) 제시

㉞ 교량 계측 관리기준치 설정 현황

- 서울시 교량별 관리기준치 설정 항목은 표 3.12와 같으며 계측항목 단계별 관리기준치는 표 3.13과 그림 3.27과 같이 관리되고 있음.

<표 3.12> 서울시 교량별 관리기준치 설정 항목

| 교량명   | 관리기준치 설정 항목                      |
|-------|----------------------------------|
| 행주대교  | 케이블장력, 받침변위, 처짐, 균열폭, 주탑경사, 강재응력 |
| 올림픽대교 | 케이블장력, 받침변위, 처짐, 주탑경사, 풍속        |
| 원효대교  | 처짐, 신축변위                         |
| 서강대교  | 케이블장력, 내풍플레이트 고유진동수              |
| 성산대교  | 강재응력                             |
| 가양대교  | 처짐, 받침변위                         |
| 한강대교  | 신축변위, 강재응력                       |
| 성수대교  | 신축변위, 강재응력                       |
| 청담대교  | 신축변위                             |
| 양화대교  | 거더응력                             |

- 현재 한강상 온라인 안전감시시스템에서는 각 센서별 관리기준치가 설정되어 있고, 각 단계별 대처방안은 3단계로 나뉘어져 있음.
- 1단계 : 중점관리 계측값(장력, 처짐, 신축이음 등) 평균이 1차 관리기준값 초과
- 2단계 : 중점관리 계측값(장력, 처짐, 신축이음 등) 평균이 2차 관리기준값 초과
- 3단계 : 중점관리 계측값(장력, 처짐, 신축이음 등) 평균이 설계값 초과

<표 3.13> 계측항목 단계별 관리기준치 설정

| 항 목          | 1차 관리기준 | 2차 관리기준 | 3차 관리기준 |
|--------------|---------|---------|---------|
| 케이블장력        | ○       | ○       | ○       |
| 처짐           | ○       | ○       | ○       |
| 풍속           | ○       | ○       | ○       |
| 외부긴장재 장력     | ○       | ○       | ○       |
| 신축변위         | ○       | -       | -       |
| 주탑경사         | ○       | -       | -       |
| 내풍플레이트 고유진동수 | ○       | -       | -       |
| 강재응력         | ○       | ○       | ○       |

OO대교

| 구분        | 단위           | 1차 관리기준 |        | 2차 관리기준 |      | 3차 관리기준 |    |
|-----------|--------------|---------|--------|---------|------|---------|----|
|           |              | 상한      | 하한     | 상한      | 하한   | 상한      | 하한 |
| 케이블장력계    | CA_01 ton    | 237     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_02 ton    | 269     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_03 ton    | 237     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_04 ton    | 273     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_05 ton    | 252     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_06 ton    | 236     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_07 ton    | 273     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_08 ton    | 241     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_11 ton    | 240     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_12 ton    | 270     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_13 ton    | 270     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_14 ton    | 245     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_15 ton    | 238     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_16 ton    | 269     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_17 ton    | 271     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
|           | CA_18 ton    | 243     | -      | 299     | -    | 315     | -  |
| 외부긴장재 장력계 | CA_09 ton    | -       | 53     | -       | 45   | -       | 34 |
|           | CA_10 ton    | -       | 40     | -       | 32   | -       | 24 |
| 주탑 경사계    | BT_1L degree | 0.03    | -0.03  | -       | -    | -       | -  |
|           | BT_1T degree | 0.035   | -0.035 | -       | -    | -       | -  |
|           | BT_2L degree | 0.03    | -0.03  | -       | -    | -       | -  |
| 균열계       | BT_2T degree | 0.035   | -0.035 | -       | -    | -       | -  |
|           | CG_01 mm     | 0.3     | -      | 0.5     | -    | 1.0     | -  |
|           | CG_02 mm     | 0.3     | -      | 0.5     | -    | 1.0     | -  |
| 신축변위계     | EM_01 mm     | 87      | -26    | -       | -    | -       | -  |
|           | EM_02 mm     | 38      | -25    | -       | -    | -       | -  |
| 변형률계      | SG_11 kg/arf | 1260    | -      | 1680    | -    | 2100    | -  |
|           | SG_12 kg/arf | 1260    | -      | 1680    | -    | 2100    | -  |
|           | SG_13 kg/arf | 1260    | -      | 1680    | -    | 2100    | -  |
|           | SG_11 kg/arf | 1260    | -      | 1680    | -    | 2100    | -  |
|           | SG_12 kg/arf | 1260    | -      | 1680    | -    | 2100    | -  |
| 처짐계       | UT_1D mm     | -       | -50    | -       | -300 | -       | -  |

OO대교

| 구분    | 단위             | 1차 관리기준 |     | 2차 관리기준 |    | 3차 관리기준 |    |
|-------|----------------|---------|-----|---------|----|---------|----|
|       |                | 상한      | 하한  | 상한      | 하한 | 상한      | 하한 |
| 신축변위계 | RUPPL01 mm     | 24      | -12 | -       | -  | -       | -  |
|       | RUPPL02 mm     | 24      | -12 | -       | -  | -       | -  |
|       | RUPPL03 mm     | 24      | -12 | -       | -  | -       | -  |
|       | RUPPL04 mm     | 24      | -12 | -       | -  | -       | -  |
|       | RUPPL05 mm     | 24      | -12 | -       | -  | -       | -  |
|       | RUPPL06 mm     | 24      | -12 | -       | -  | -       | -  |
| 응력계   | SLPPL01 kg/arf | 852     | -   | 1136    | -  | 1420    | -  |
|       | SLPPL02 kg/arf | 852     | -   | 1136    | -  | 1420    | -  |

OO대교

| 구분     | 단위        | 1차 관리기준 |     | 2차 관리기준 |      | 3차 관리기준 |    |
|--------|-----------|---------|-----|---------|------|---------|----|
|        |           | 상한      | 하한  | 상한      | 하한   | 상한      | 하한 |
| 케이블장력계 | CA_01 ton | 425     | -   | 521.4   | -    | 548.9   | -  |
|        | CA_02 ton | 504     | -   | 614.1   | -    | 646.5   | -  |
|        | CA_03 ton | 619     | -   | 706.8   | -    | 744.1   | -  |
|        | CA_04 ton | 699     | -   | 706.8   | -    | 744.1   | -  |
|        | CA_05 ton | 688     | -   | 706.8   | -    | 744.1   | -  |
|        | CA_06 ton | 690     | -   | 706.8   | -    | 744.1   | -  |
|        | CA_07 ton | 556     | -   | 556.3   | -    | 585.6   | -  |
|        | CA_08 ton | 556     | -   | 556.3   | -    | 585.6   | -  |
|        | CA_09 ton | 428     | -   | 521.4   | -    | 548.9   | -  |
|        | CA_10 ton | 504     | -   | 614.1   | -    | 646.5   | -  |
|        | CA_11 ton | 638     | -   | 706.8   | -    | 744.1   | -  |
|        | CA_12 ton | 702     | -   | 706.8   | -    | 744.1   | -  |
| 처짐계    | DG_01 mm  | -       | -62 | -       | -150 | -       | -  |
|        | DG_02 mm  | -       | -62 | -       | -150 | -       | -  |
| 주탑 경사계 | BT_1L m"  | 30      | -30 | -       | -    | -       | -  |
|        | BT_1T m"  | 35      | -35 | -       | -    | -       | -  |
| 신축변위계  | EM_01 mm  | 27      | -56 | -       | -    | -       | -  |
|        | EM_02 mm  | 18      | -54 | -       | -    | -       | -  |
| 풍향풍속계  | WS_1S mph | 20      | -   | 23.3    | -    | 55      | -  |
|        | WS_2S mph | 20      | -   | 23.3    | -    | 55      | -  |

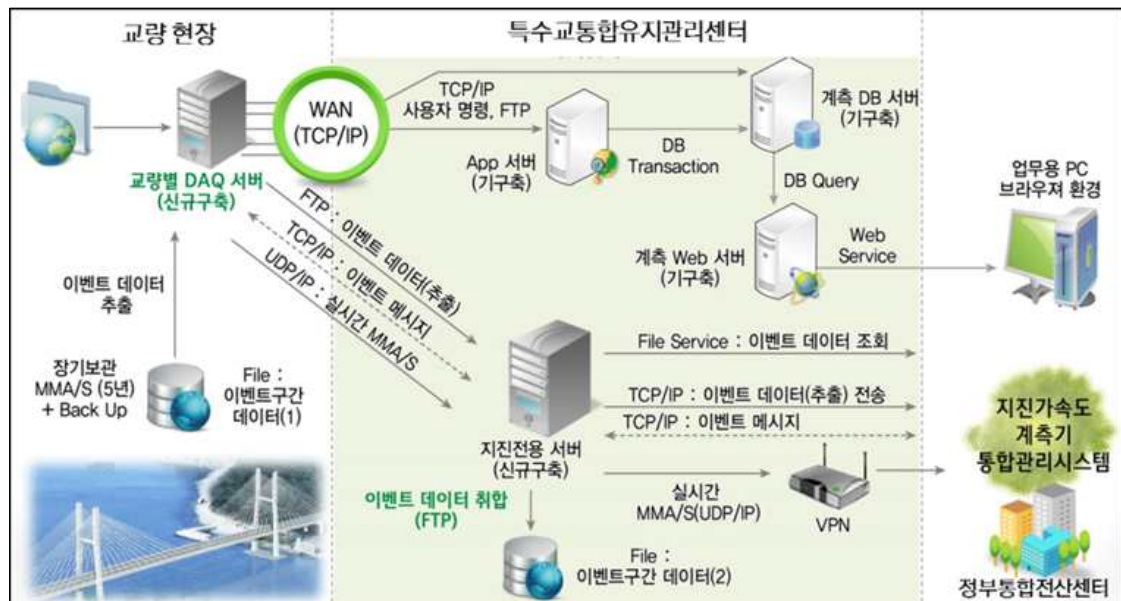
OO대교

| 구분    | 단위             | 1차 관리기준 |     | 2차 관리기준 |    | 3차 관리기준 |    |
|-------|----------------|---------|-----|---------|----|---------|----|
|       |                | 상한      | 하한  | 상한      | 하한 | 상한      | 하한 |
| 신축변위계 | RUPPL01 mm     | 36      | -32 | -       | -  | -       | -  |
|       | RUPPL02 mm     | 29      | -31 | -       | -  | -       | -  |
|       | RUPPL03 mm     | 32      | -34 | -       | -  | -       | -  |
|       | RUPPL04 mm     | 33      | -29 | -       | -  | -       | -  |
| 응력계   | SLPPL01 kg/arf | -0.56   | -   | 1680    | -  | 2100    | -  |
|       | SLPPL02 kg/arf | 0.99    | -   | 1680    | -  | 2100    | -  |

<그림 3.27> 관리기준치 설정사례(서울시)

㉔ 관리기준치 설정 현황(한국시설안전공단)

- 일반국도의 특수교량 계측시스템은 1996년 남해대교, 진도대교, 돌산대교에 최초로 구축되었으며, 2000년대에 제2진도대교, 백야대교, 소록대교, 압해대교에 계측시스템이 구축되었다. 2020년까지 일반국도에 약 20여개의 현수교, 사장교에 계측시스템이 신설될 것으로 계획되어 있어 효율적 관리를 위한 통합의 필요성 대두됨.
- 이에 따라 “특수교 유지관리체계 개선 방안(국토교통부, 2007)”이 마련되었으며, 2009년 일반국도 특수교량의 통합계측관리를 위하여 통합관리계측시스템을 구축하여 현재까지 운영 중에 있음(그림 3.28 참조).



<그림 3.28> 특수교 통합유지관리 센터 운영

- 또한, 2009년 3월 시행된 「지진재해대책법」 시행령 제5조에 의거하여 현수교와 사장교의 지진가속도계측이 의무화되었으며, “지진가속도계측기 설치 및 운영기준”이 2010년 9월 고시(소방방재청 고시 제2010-30호)되어 시행됨에 따라 지진가속도계측기의 설치 위치와 수량이 구체화되었음.
- 지진가속도 계측기기는 일반국도 특수교량 10개소에 설치되었으며, 2015년 10월 지진가속도 데이터를 행정안전부에 연계하였음.
- 지진가속도 데이터는 행정안전부로 연계될 뿐만 아니라 통합관리계측시스템으로도 연계되어 교량의 구조 건전도를 상시 모니터링 하는데 활용됨.
- 주요 계측항목으로 온도, 보강거더 가속도, 주탑 가속도, 지진 가속도, 처짐, 케이블 장력, 동적 변형률, 정적 변형률, 풍속, 신축변위 등이 있으며, 표 3.14와 같은 관리 기준 설정 기본방향에 대하여 설정값을 제시함.

<표 3.14> 관리기준 설정 기본방향

| 센서          |    | 설정값                  | 설정 근거                                                                  |
|-------------|----|----------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 온도          | 주의 | -10~50℃<br>(-15~35℃) | - 도로교설계기준 평균 온도의 범위                                                    |
|             | 경고 | -15~65℃<br>(-20~50℃) | - 부재별 최대 계측 온도 고려                                                      |
| 가속도<br>(거더) | 주의 | ±50gal               | - 케이블 강교량 설계 지침 내풍 사용성 기준                                              |
|             | 경고 | 교량별                  | - 월 최대값의 극치분포 적용 200년 빈도 재현기간의 가속도<br>- 상시 최대+태풍시 최대<br>- 주의치×2 (신설교량) |
| 가속도<br>(주탑) | 주의 | 교량별                  | - 월 최대값의 극치분포 적용 100년 빈도 재현기간의 가속도                                     |
|             | 경고 | 교량별                  | - 거더 가속도와 동일                                                           |
| 가속도<br>(지진) | 주의 | ±20gal               | - MMI 진도 IV                                                            |
|             | 경고 | ±30gal               | - MMI 진도 V                                                             |
| 치짐          | 주의 | 교량별                  | - 바람의 난류에 의한 진동폭(풍동실험 보고서)                                             |
|             | 경고 | 교량별                  | - 바람의 난류에 의한 진동폭+해석(차량,온도)                                             |
| 장력          | 주의 | 교량별                  | - 계측 초기 장력±해석(차량,온도)                                                   |
|             | 경고 | 교량별                  | - 허용 장력                                                                |
| 변형률<br>(동적) | 주의 | 교량별                  | - 월 최대값의 극치분포 적용 100년 빈도 재현기간의 변형률<br>- 경고치의 80%(신설교량)                 |
|             | 경고 | 교량별                  | - 월 최대값의 극치분포 적용 200년 빈도 재현기간의 변형률<br>- 온도+차량 적용 해석 결과(신설교량)           |
| 변형률<br>(정적) | 주의 | 교량별                  | - 경고치의 80%                                                             |
|             | 경고 | 교량별                  | - 온도+차량 적용 해석 결과                                                       |
| 풍속          | 주의 | 20m/s                | - 10평균 풍속 25m/s 차량 통제                                                  |
|             | 경고 | 30m/s                | - 재난 대응 매뉴얼의 차량 통제 풍속                                                  |
| 신축          | 주의 | 교량별                  | - 주의 온도 범위 적용 신축량                                                      |
|             | 경고 | 교량별                  | - 경고 온도 범위 적용 신축량                                                      |

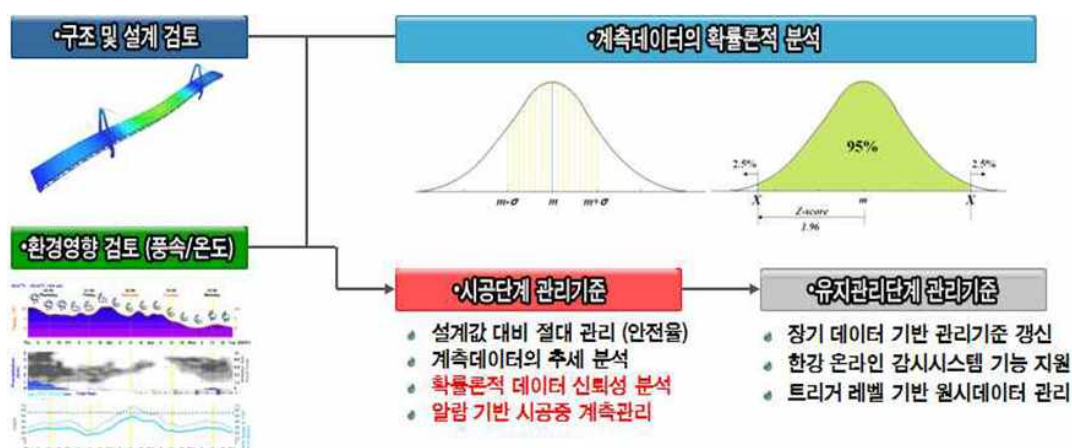
㉔ 관리기준치 설정방법 및 계측 항목별 문제점 분석

- 관리기준 설정을 위한 높은 신뢰도의 초기치 확보 필요
  - 일반적으로 모든 계측 센서는 설치완료 직후 그 초기치를 측정하여 기록, 관리하는 것이 원칙이고 측정초기 값은 계측서버에 데이터베이스화 하여 유지관리단계까지 계측의 연속성을 확보 하여야 함.
  - 초기 계측 값의 원시데이터와 환산계수가 모두 저장되지 않거나 예상치 못한 계측 중단 또는 계측 센서나 케이블을 통한 노이즈의 유입 등으로 시공 중 초기치를 확보하지 못한 경우 향후 관리기준치의 산정에 문제가 발생하게 됨.
- 관리기준 설정기준의 재정립 필요
  - 현재 교량의 계측 관리기준은 대부분 공용 중 교량의 안전성과 사용성을 확보하기 위해 각 계측 센서의 측정값을 해석 치에 근거하여 하나의 특정 값이나 범위를 설정하여 주의와 경고단계로 관리되고 있음.
  - 시공 중 계측과 같은 비교적 단기간의 계측에서는 이러한 기준 값의 적용이 관리기준으로 사용가능하지만 유지관리 단계의 장기계측에서는 특별한 외력의 변화 없이 관리기준치를 초과하는 경우, 관리자마다 그 해석을 놓고 의견이 다른 경우가 발생함.
- 일반적 관리기준 설정에 대한 문제점 분석
  - 관리기준치를 설정하는 과정은 설계기준에서 제시되는 허용 값에 기초해서 설정하게 됨에 따라 비정상적인 계측 Data가 발생함에도 안전측으로 설정된 관리기준치 문제로 지나쳐 버리는 문제가 발생할 수 있음.
  - 구조해석 결과 값을 기준으로 산정된 관리 기준은 변동성 있는 재료성질(반입 재료의 물성치가 카탈로그 또는 시방서 상의 물성 치와 상이한 경우)을 정확히 반영하지 못하여 실제 현장에서 측정되는 계측 값과 구조해석 결과 값에 차이가 발생하는 경우가 빈번함.
  - 구조해석 과정에서 생략되는 부재, 단면치수변화, 강성변화, 물성치 등을 정확하게 반영하지 않은 문제와 점진적으로 교량이 노후화 되어 감에 따라 교량의 특성변화를 반영하지 못하게 되는 문제점으로 실측치와 계산 값과는 차이가 발생하게 됨.
  - 구조해석 결과 값은 현장에 적용되는 하중의 영향, 재료성질 변화(현장에 적용된 재료상수와 설계적용 물성치 차이)를 정확히 반영하였다고 볼 수 없으므로 지속적인 관리 기준치로 사용하는 데는 문제가 있음.

㉕ 관리기준치 설정 효율화 방안

- 관리단계 설정
  - 주의/경고 2단계 관리기준이 일반적으로 사용되고 있으며, 최근에는 능동적 관리를 위해 주의/경고/위험 3단계로 설정하고 있는 추세임.
  - 본 연구에서는 각 단계별 관리기준치를 합리적으로 설정하기 위한 연구로서 관리단계에 대한 중요도는 크지 않으나 3단계(3 Level)를 표준으로 제안함. (관리단계는 계측 항목의 특성에 따라 적합한 레벨로 개별 설정해도 무관)
- 상위 레벨 관리기준치 대비 하위레벨 관리기준치 요율 설정방안
  - 관리기준을 설정할 때에는 최상위레벨(경고 또는 위험 등)을 설정한 후 이에 대한 상대적 값으로 하위레벨을 설정하는 것이 일반적임.
  - 예를 들어, ‘경고’에 대한 관리기준치는 설계기준/구조해석/기존계측자료 등에 의거 하여 나름 합리적 근거에 의거 설정하고 있으나, ‘주의’에 대한 기준치는 근거없이 단순히 경고치의 60%, 80%, 90% 등으로 설정하는 경우가 있음.

- 가장 높은 레벨의 관리기준치가 설정되고 하위 레벨의 관리기준치를 일정 요율로 설정해야 할 경우, 월간 또는 연간 경보 횟수에 근거하여 정기적인 점검이 물리적으로 가능한 요율을 적용하는 것을 제안함.
- 구조해석에 의한 응력 관리기준치
  - 설계기준에 명시된 허용응력으로 주의 또는 경고를 설정하는데, 허용응력 범주는 부재 및 단면설계시 안전측 설계를 위한 기준이지, 완공계에서 구조물의 안전성을 상시 모니터링을 위한 상한값으로 적용되는 것은 과다하게 보수적인 값으로 볼 수 있음.
  - 즉, 허용응력을 아주 약간 초과하여 ‘경고’레벨이 되었을 때 과연 경고 수준의 구조적 안전성에 문제가 있다고 볼 수는 없음.
  - 그러므로, 극한 강도 레벨이 관리기준치의 최상위 레벨이되고, 허용응력은 차순위 레벨로 관리해야 될 것으로 사료됨.
- ‘고정관리기준’에서 ‘변동관리기준’으로 재설정
  - 일반적으로 교량의 계측 관리기준은 설계정보 및 구조해석 결과에 따른 이상적인 거동을 전제로 하여 안전성을 확보하기 위해 각 관리주체마다 조금씩 상이한 범위로 설정되는 것이 일반적이나 실제 현장에서의 거동은 해석과 다르며 장기계측 시 예상치 못한 외력(온, 습도), 센서나 로거의 Signal Draft 등 예상과 다른 계측 값이 측정되는 경우가 있음.
  - 따라서 현재 절대 값 위주로 설정된 관리기준치는 다소 보수적인 기준이 되며 장기계측 시 계절적인 온도영향으로 기준치를 초과하는 경우가 발생합니다. 따라서 시공 중 계측 결과를 바탕으로 통계적인 범위의 관리기준치를 설정한 후 일정 주기마다 업데이트하여 관리하는 것이 바람직함.
- 계측데이터의 확률론적 분석
  - 계측 관리기준치의 설정에는 계측데이터의 신뢰도를 확률론적으로 분석하여, 계측된 데이터가 관리기준치 내에서 안정 또는 경고 값을 나타내는데 얼마만큼의 신뢰도를 갖는지 같이 정보를 제공할 필요가 있음.
  - 이를 위해서는 그림 3.29와 같이 유사한 제원이나 환경 그리고 구조형식을 갖는 교량의 축적된 장기 계측데이터를 활용하거나 관리기준치 설정 대상교량의 시공 중 계측 값을 이용하여 설정하는 방법이 있음.



<그림 3.29> 구조분석 및 시공/유지관리 관리기준

- 디지털 트윈(Digital Twin)을 이용한 관리기준치 업데이트 방안
- 최근 환경요인의 영향을 많이 받는 물리시스템에 대한 공학모델링과 실시간 대규모 데이터를 연동하여 모델링하고 시뮬레이션 할 수 있는 디지털지능트윈 개체모델 및 시뮬레이터 개발하는 실시간 학습기능 내재 디지털 트윈기술이 활발히 연구되고 있음.
- 교량의 실제 모델과 실시간 계측데이터를 통해 디지털 트윈을 만든 후 다양한 시나리오에 의한 시뮬레이션을 통해 거동을 예측하고 이를 이용하여 주기적으로 대상교량의 관리기준치를 업데이트 하는 기술을 적용할 수 있음.
- 교량의 디지털 트윈(Digital Twin)은 현실세계의 물리적 교량을 하나의 시스템으로 보고 동적 소프트웨어 모델로 구성하여 디지털 자산으로 만드는 것임.
- 디지털 트윈에서는 다양한 센서에서 입수한 데이터를 통해 현재 교량의 상태 파악하고, 변화에 대응하며, 운영 개선 및 가치 향상 솔루션을 제공이 가능함.
- 디지털 트윈은 메타데이터(분류, 구성, 구조)를 포함해, 조건이나 상태(위치, 기온), 이벤트 데이터(시계열), 애널리틱스(알고리즘, 규칙)와 같은 복합적인 요소를 제공할 수 있으므로 관리기준치의 실시간 업데이트가 가능함.

#### ㉡ 교량 계측시스템 관리기준치 설정 가이드(안)

- 개요
- 본 가이드는 교량의 상시 안전관리 계측시스템의 관리기준치를 효율적으로 설정하기 위한 참조 자료로 활용할 수 있도록 한 것으로 최종 관리기준치 설정은 관리주체, 교량 및 계측 전문가의 종합적 검토에 의해야 함.
- 계측 항목별 관리기준치 설정 가이드는 아래와 같이 적용되어야 함.

#### [보강거더 변형률(Strain of stiffening girder)]

- 상시 계측시스템의 변형률로부터 구조계 전체의 안전성을 확보하기 위한 관리기준(허용응력 등)을 설정하기 위해서는 고정하중 상태의 응력, 온도에 의한 무응력 변형 등이 반드시 고려되어야 함.
- 강교에서는 피로 취약 부위에 변형률 센서를 설치하여 피로에 대한 관리기준을 설정하여 관리가 요구됨.
- 활하중과 풍하중에 대한 변형률(응력) 변화를 별도 관리기준으로 설정하여 관리 필요함.
- 장기간 온도에 의한 변형률의 변화에 대한 관리기준은 확률 모델을 이용하여 특이치의 발생 여부를 탐지할 수 있도록 관리기준 설정 필요.

#### [외부 긴장재 장력(Tension of external tendon)]

- 외부 긴장재 장력은 강선의 극한강도와 허용응력 값을 기준으로 관리기준을 설정하고, 하한관리 시행 필요.
- 일부 소선(스트랜드)의 파단 발생을 모니터링을 할 경우에는 소선단위 장력관리를 시행할 수 있으며, 이때에는 관리기준치 상한관리를 시행 필요.

#### [케이블 장력(Cable tension)]

- 케이블 장력 관리기준은 활하중과 온도하중 등을 고려하여 상한값과 하한값 모두 관리기준 설정이 요구됨.
- 케이블 전체 파단이 아닌 내부 소선/스트랜드의 손상/파단을 모니터링하기 위해서는 케이블 가속도값을 직접 활용하여 장력 관리기준과 함께 가속도의 관리기준 병행 관리 필요.(Cross Checking 가능)
- 향후 장기적인 가속도 측정값을 토대로 통계적 방법을 활용하여 케이블 장력관리 필요.

### [신축 변위(Expansion displacement)]

- 신설교량의 경우 설계시 계산된 이론치를 활용하여 상하한 관리기준치 적용이 타당함
- 기존 계측데이터가 있는 경우는 통계적 분석을 통해 수립하는 신축 변위량을 기준으로 관리기준치를 설정하고 계절적 영향을 고려하여 변동 관리기준치를 적용.

### [처짐(deflection)]

- 주형의 처짐에 대한 관리기준은 도로교설계기준의 활하중에 의한 처짐 사용성 기준 ( $L/400$ ,  $L/350$  등)을 적용하여 설정하거나, 활하중, 풍하중, 온도하중을 고려한 최대 해석 처짐을 적용.
- 도로교설계기준의 활하중에 의한 사용성 처짐기준은 경간장 200m이상의 케이블교량 (사장교, 현수교 등)에 적용하기에는 너무 큰 값으로 적용이 불가하므로 처짐에 대한 통계적 분석을 통해 이상 처짐을 감지하는 방향으로 관리기준치를 설정할 필요가 있음.
- 단, 레이저 변위계의 측정값은 측정점과 센서(트랜스미터)의 거리에 비례하여 오차가 증가하므로 반드시 오차를 고려하여 설정하여야 하며, 주탑에 설치하는 레이저 변위계는 주탑경사계를 이용하여 오차를 보정할 것.

### [균열(Crack)]

- 균열에 대한 관리기준치는 「안전점검 및 정밀안전진단 세부지침」 상태평가 기준을 참조하여 다음 표 3.15와 같이 제안함.

<표 3.15> 콘크리트 교량 관리단계 및 기준

| 부 재                                         | 관리단계   | 관리기준치  | 비 고                  |
|---------------------------------------------|--------|--------|----------------------|
| 콘크리트 바닥판<br>철근콘크리트 거더<br>콘크리트 교대<br>콘크리트 교각 | 1차(주의) | 0.3 mm | 해당 부재 균열 상태평가 기준 “c” |
|                                             | 2차(경고) | 0.5 mm | 해당 부재 균열 상태평가 기준 “d” |
|                                             | 3차(위험) | 1.0 mm | 해당 부재 균열 상태평가 기준 “e” |
| 프리스트레스<br>콘크리트 거더                           | 1차(주의) | 0.2 mm | 해당 부재 균열 상태평가 기준 “c” |
|                                             | 2차(경고) | 0.3 mm | 해당 부재 균열 상태평가 기준 “d” |
|                                             | 3차(위험) | 0.5 mm | 해당 부재 균열 상태평가 기준 “e” |
| 콘크리트 가로보                                    | 1차(주의) | 0.3 mm | 해당 부재 균열 상태평가 기준 “c” |
|                                             | 2차(경고) | 0.5 mm | 해당 부재 균열 상태평가 기준 “d” |
|                                             | -      | -      | -                    |

### [보강거더 진동(vibration of stiffening girder)]

- 보강거더의 경우 수직방향과 수평방향의 가속도 관리기준이 달라야 하며 수직방향 (중력방향)과 수평방향(교축직각방향)의 기준을 별도로 정할 필요가 있음.
- 차량에 의한 진동관리 및 피로에 대한 안전성 검토를 위하여 교량을 주행하는 중차량의 중량, 속도, 차종 등의 자료 수집 및 관리가 필요함.
- 따라서 고속측중계(Weigh-in-Motion)에 의한 차량 자료 수집시스템을 설치, 운용하는 것이 바람직함.
- 또한 이 시스템을 이용하여 과적차량 및 이상진동시의 통행제한 등의 교량 운영관리 지침 등에 활용할 수 있음.

### [주탑 진동(vibration of pylon)]

- 가속도의 진폭은 가진 하중의 진동 특성에 따라 다르므로 사용성에 대한 일관성 있는 기준으로 사용하기 어려우므로 통계적인 방법을 이용하여 관리기준을 정의하여 특이 진동 현상의 발생 유무 모니터링 시 활용 가능 .

### [풍속(Wind speed)]

- 안전관리기준(교량의 구조안전성)과 재난관리기준(재난대응매뉴얼)을 이원화 관리가 필요.
- 안전관리기준은 교량의 설계풍속을 기준으로 설정하고, 재난관리기준은 재난대응매뉴얼에 의거 설정.
- 재난관리기준은 현행 관리기준으로 적용하되, 구조안전성에 대한 검토(점검)는 설계풍속 이상에서 시행 필요.

### [부재 온도(Temperature of members)]

- 부재 온도는 신축변위, 변형률, 처짐 등에 반영되는 수치로서 그 자체의 값으로 알람 (관리기준치 설정 불필요)보다 해당 온도조건에서 신축거동에 대한 적합성을 판별하는 데이터로 활용하는데 의미가 있음.

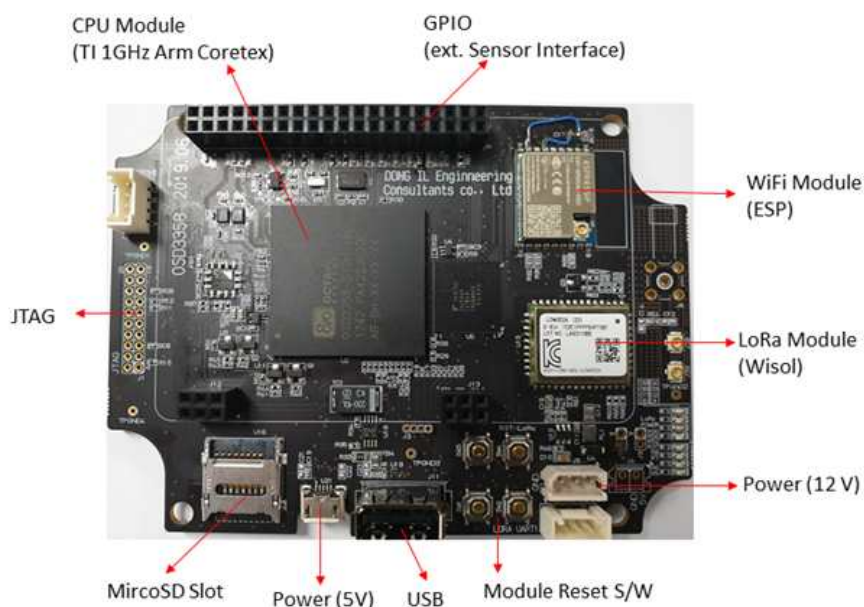
## 다. 3차년도 세부 연구내용 및 결과

### (1) 동일기술공사(주관연구기관)

#### ① 연구1 : 상용화 가능한 LoRa 스마트센서노드 개발

##### ㉠ 개요

- 2차년도 제작한 LoRa LPWAN 기반 무선 스마트센서노드의 저전력 및 경제성을 고려하여 상용화가 가능한 LoRa 스마트센서노드를 그림 3.30과 같은 개발하였음.



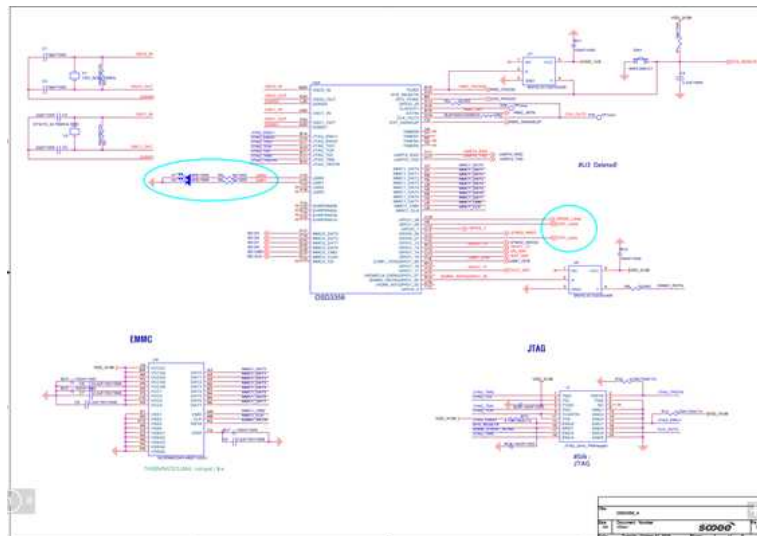
<그림 3.30> LoRa LPWAN 기반 무선 스마트센서노드

㉞ 성능 및 제원

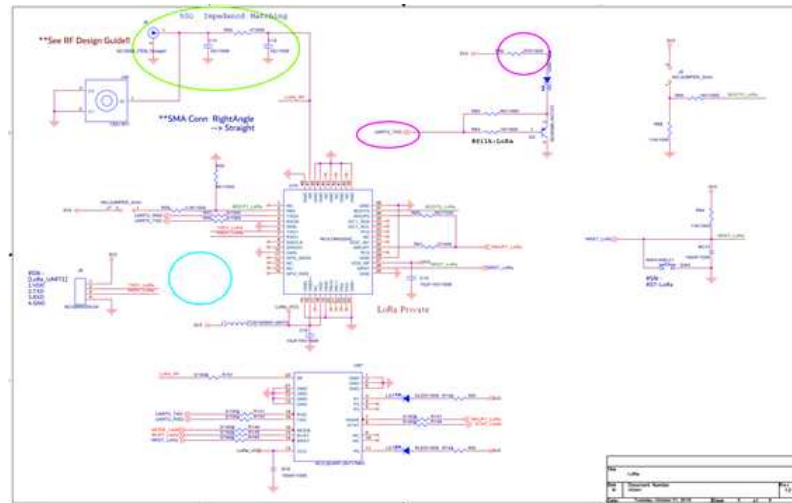
- CPU 모듈 : TI AM3358 1GH Arm Coretex
- LoRa 통신 모듈 : Wisol LOM 202A
- WiFi 모듈 : ESP-WROOM 02U
- 전원 : DC 5V / 12V
- 외부저장장치 :Micro SD / USB
- OS : freeRTOS

㉞ 회로 설계

- LoRa 스마트센서노드는 2차년도에 개발된 스마트센서노드에 상용화를 대비하여, LoRa 통신 모듈을 국산 Wisol 제품으로 변경하여 LoRa 통신 모듈에 대한 업데이트 등의 제조업체 기술지원을 강화하였으며, CPU 모듈 또한 내구성을 고려하여, 패키지 타입으로 제작된 Octavo 社의 OSD 3358으로 변경함.
- 2차년도 제작된 스마트센서노드 보드의 경우, 운영체제(OS)를 범용 운영체제인 Linux기반의 시스템으로 구현하였으나, 3차년도는 설계/제작된 스마트센서노드의 최적화와 저전력 운용을 위해 RTOS 기반의 freeRTOS로 구현되었으며, 스마트 센서노드의 주요 스키매틱은 그림 3.31~3.32와 같음.



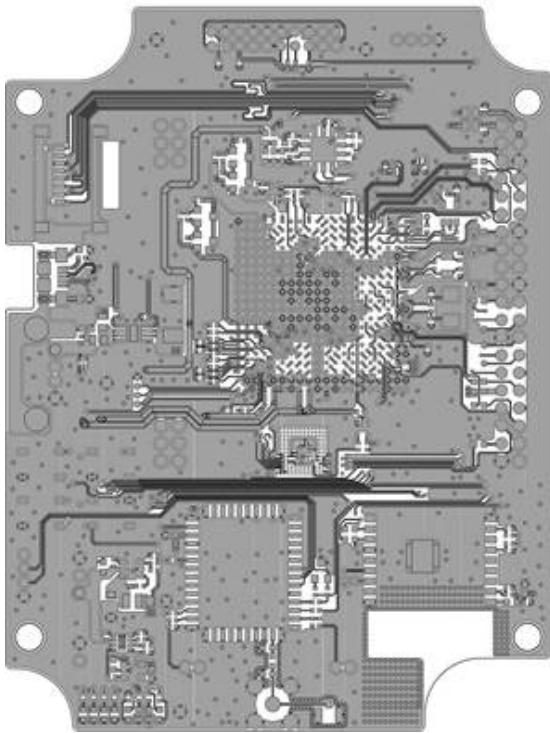
<그림 3.31> LoRa 스마트센서노드 전체 Schematic 설계도



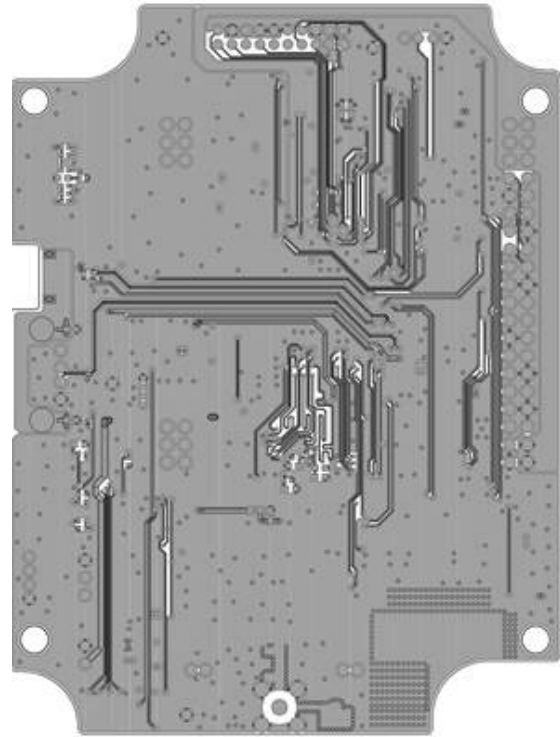
<그림 3.32> LoRa 스마트센서노드 LoRa 무선 통신부 설계도

㉔ PCB Design

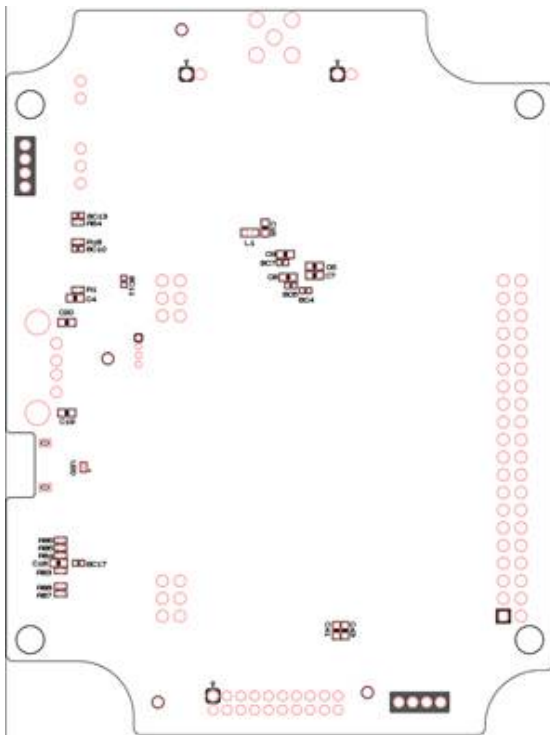
- PCB 보드는 그림 3.33~3.36과 같이 총 4 Layer로 구성되어 커스텀 제작된 하우징 규격에 맞도록 설계되었음.
- LoRa의 미세신호를 다룰 수 있으며 신호 수신율에 영향을 줄 수 있는 안테나 수신부의 Impedance Matching을 고려하여 PCB 보드를 설계하였음.



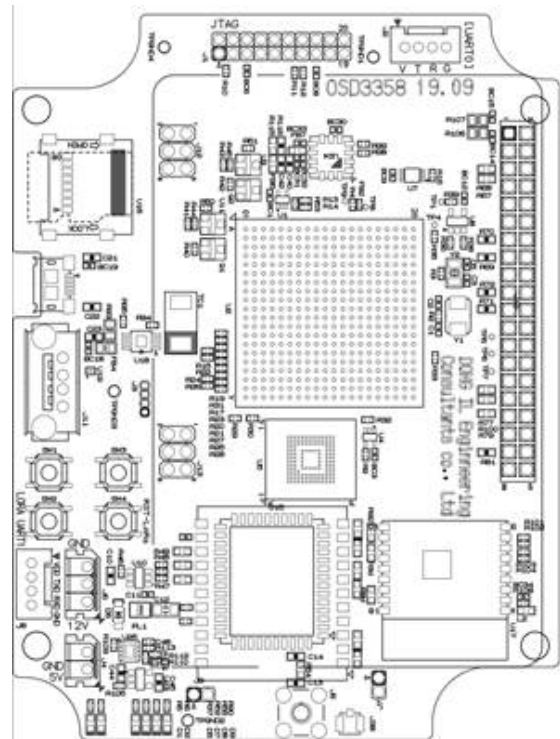
<그림 3.33>LoRa 스마트센서 노드  
PCB Layer1



<그림 3.34>LoRa 스마트센서 노드  
PCB Layer4



<그림 3.35>LoRa 스마트센서 노드  
PCB b-silk



<그림 3.36>LoRa 스마트센서 노드  
PCB t-silk

② 연구2 : 기존 계측센서 Data 입력을 위한 DAQ 보드 개발

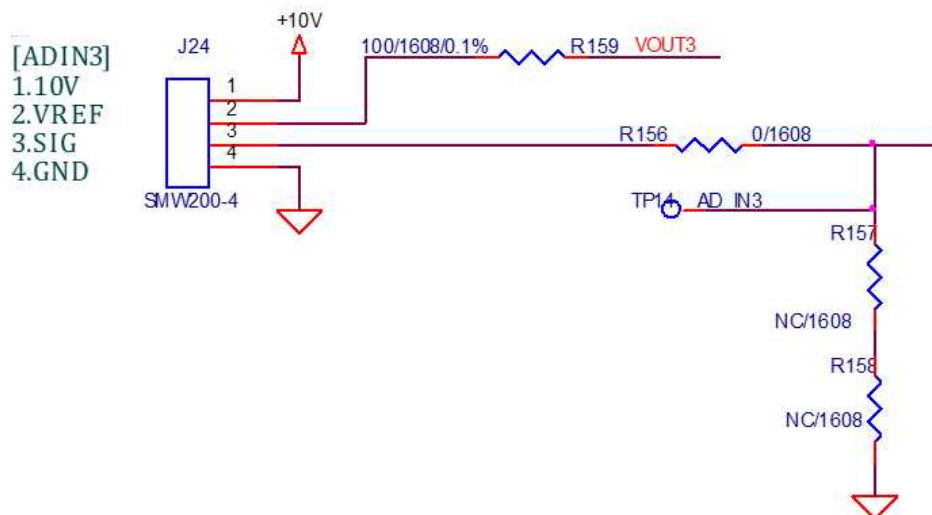
- 신축변위계, 변형률계, 레이저 변위계 등과 같은 MEMS기반으로 구현되기 어렵고 다양한 계측 Data 출력형식을 갖는 기존 계측센서들의 LoRa통신 구현을 위해 그림 3.37과 같이 DAQ 보드를 개발하였음.
- DAQ(Data Acquisition) 보드는 센서 및 외부 신호 입력의 목적으로 디지털 입력신호를 수신목적으로 RS-232 2포트, RS-485 1포트 및 아날로그 입력(전원 타입, 전압 타입, 저항 타입)신호 목적으로 4포트를 지원하는 형태로 개발하였음.



<그림 3.37> LoRa DAQ 보드

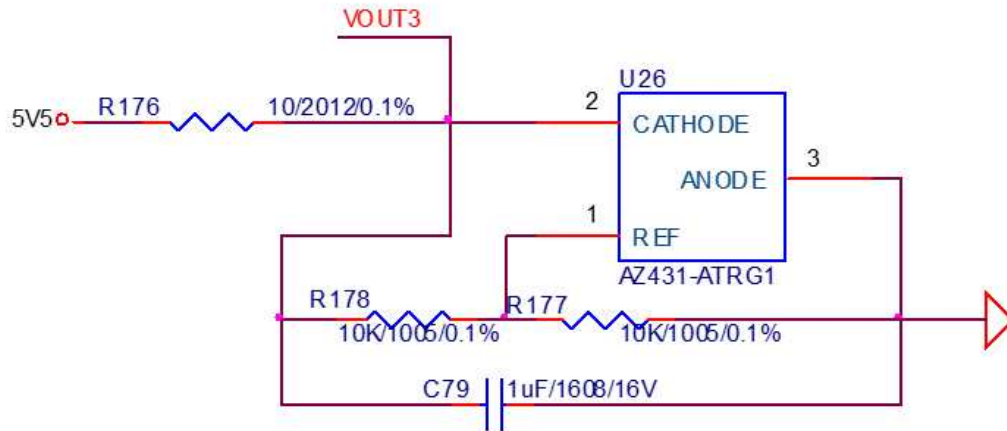
㉞ 설계 개요

- 아날로그 입력은 신호의 종류에 따라 증폭도 조절을 위해, 입력분배 회로와 Programmable OPAMP가 탑재되어, 미세 신호 입력부터 고준위 신호를 모두 수용할 수 있도록 설계함.
- 입력신호 분배회로는 그림 3.38과 같이 OPAMP의 정격 입력(-5V~+5V)에 신호레벨을 맞추기 위한 회로로 OPAMP가 받아들일 수 있는 신호레벨보다 높은 신호를 적정하게 낮출 수 있음.



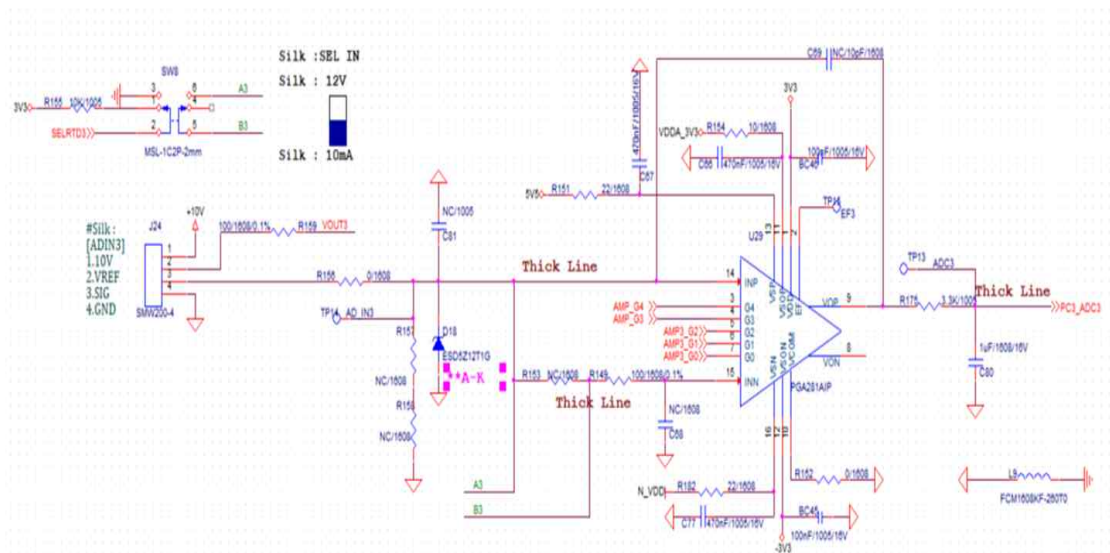
<그림 3.38> 입력신호 분배 회로

- 입력 센서에 따라서는 전류원(Current Source) 또는 전압원(Voltage Source)가 필요한 경우도 있어서, 그림 3.39와 같이 입력부분에 전류원 또는 전압원을 공급할 수 있도록 구성함.



<그림 3.39> 센서의 전류원(전압원)

- 본 DAQ회로에 사용한 OPAMP는 TI사의 PGA281AIP이며, 그림 3.40과 같이 PGA281은 MPU에서 증폭도를 S/W로 제어 할 수 있는 Porgrammable OPAMP로서 안정성 있는 동작을 제공함.
- 각종 센서의 아날로그 입력은 센서에 따라서 미약신호(수mV)가 입력될 수도 있고, 높은 레벨의 신호(High Voltage)일 수도 있기 때문에 SW적으로 입력에 따라 각각의 아날로그 입력포트의 증폭도를 조절할 수 있도록 하였음.

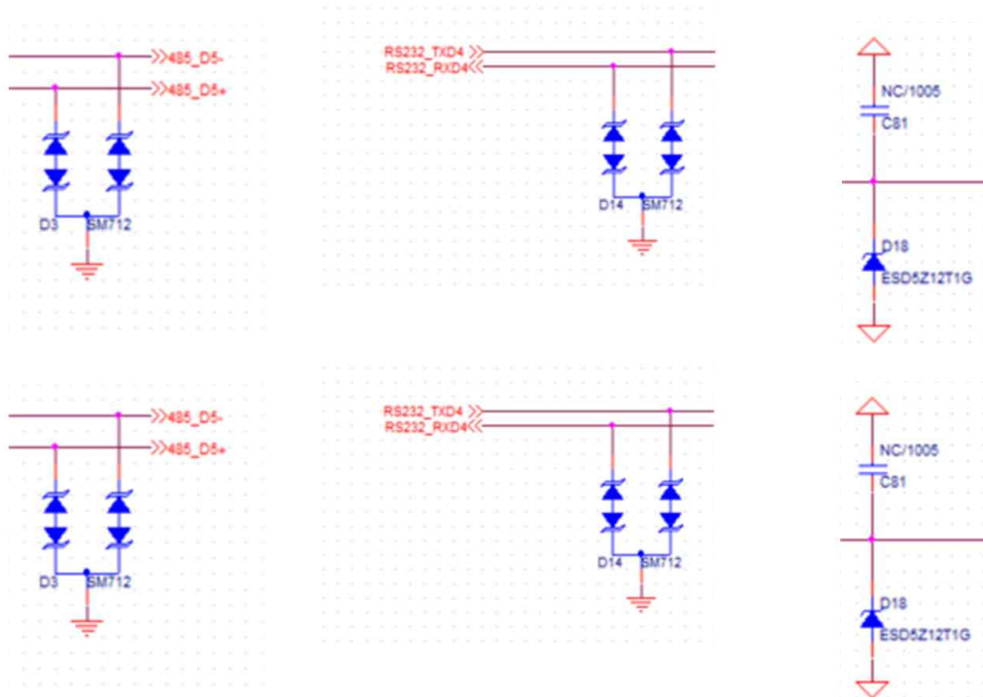


<그림 3.40> PGA281 Analog 입력단 설계

| G3:G0 | G4 = 0                          | G4 = 1                          |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0000  | 0.125                           | 0.172                           |
| 0001  | 0.25                            | 0.344                           |
| 0010  | 0.5                             | 0.688                           |
| 0011  | 1                               | 1.375                           |
| 0100  | 2                               | 2.75                            |
| 0101  | 4                               | 5.5                             |
| 0110  | 8                               | 11                              |
| 0111  | 16                              | 22                              |
| 1000  | 32                              | 44                              |
| 1001  | 64                              | 88                              |
| 1010  | 128                             | 176                             |
| 1011  | Reserved <sup>(1)</sup> (0.125) | Reserved <sup>(1)</sup> (0.172) |
| 1100  | Reserved <sup>(1)</sup> (0.125) | Reserved <sup>(1)</sup> (0.172) |
| 1101  | Reserved <sup>(1)</sup> (0.125) | Reserved <sup>(1)</sup> (0.172) |
| 1110  | Reserved <sup>(1)</sup> (0.125) | Reserved <sup>(1)</sup> (0.172) |
| 1111  | Reserved <sup>(1)</sup> (0.125) | Reserved <sup>(1)</sup> (0.172) |

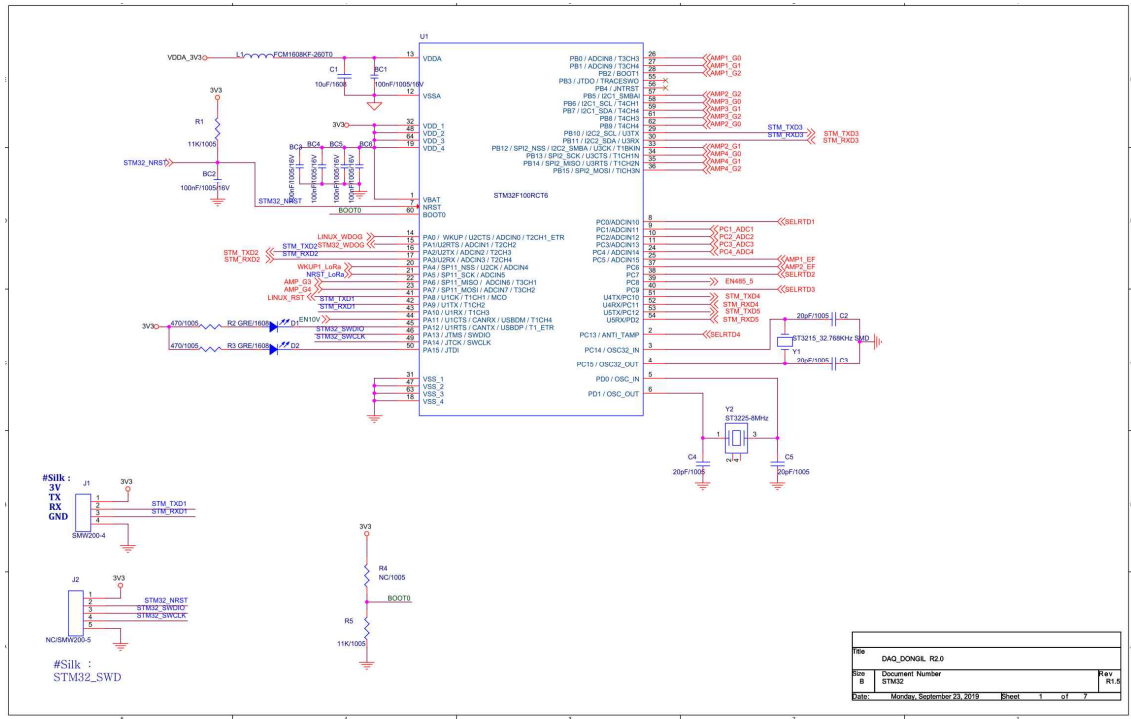
<그림 3.41> OP-AMP gain control table

- 현장에서는 입력되는 신호가 예상치 못한 강한 노이즈를 동반하거나, 낙뢰 등 환경적인 요인으로 정상적인 데이터를 입력받지 못하는 경우도 발생할 수 있기 때문에 위와 같은 요인으로 인한 추가적인 보호회로가 구성되어 있으며 주요 설계는 그림 3.42와 같음.



<그림 3.42> 입력부 낙뢰 및 노이즈 방지 회로

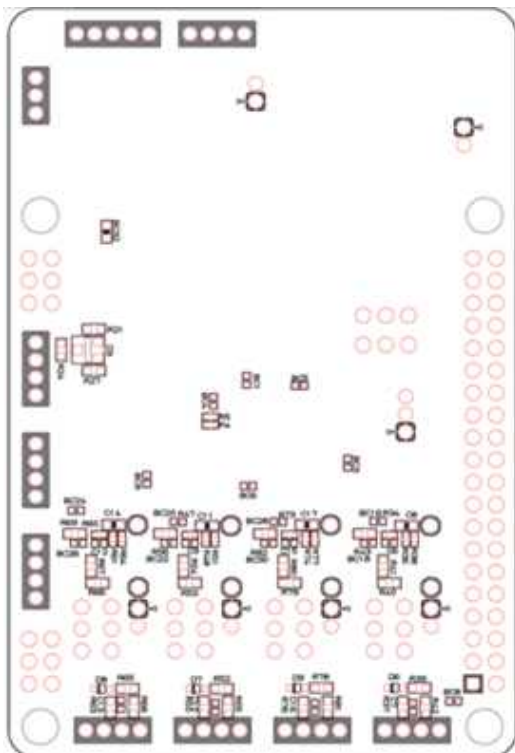
## ㉑ DAQ Schematic



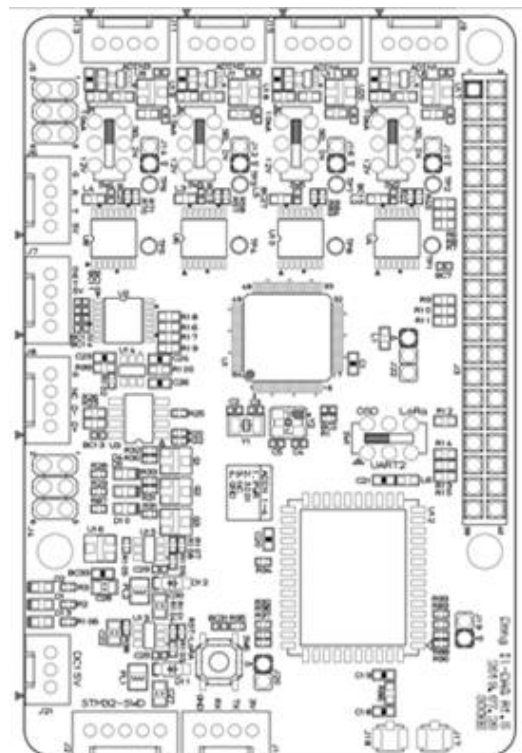
<그림 3.43> DAQ 보드 Schematic Design

## ㉒ DAQ PCB Design

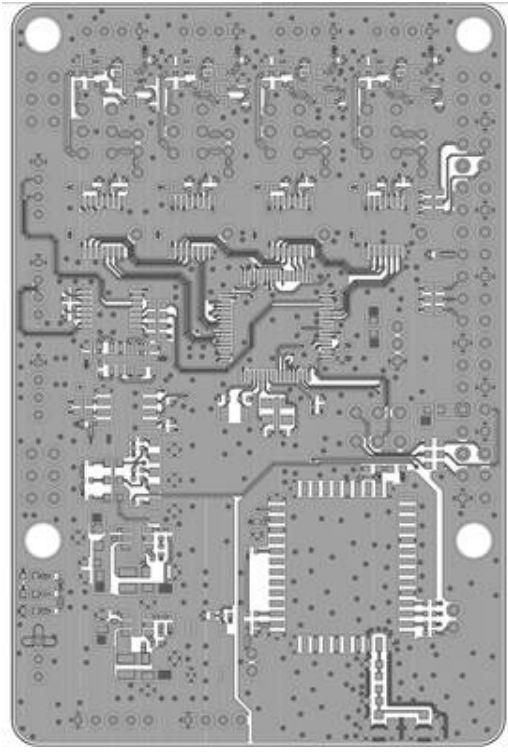
- DAQ의 PCB는 4 Layer로 설계



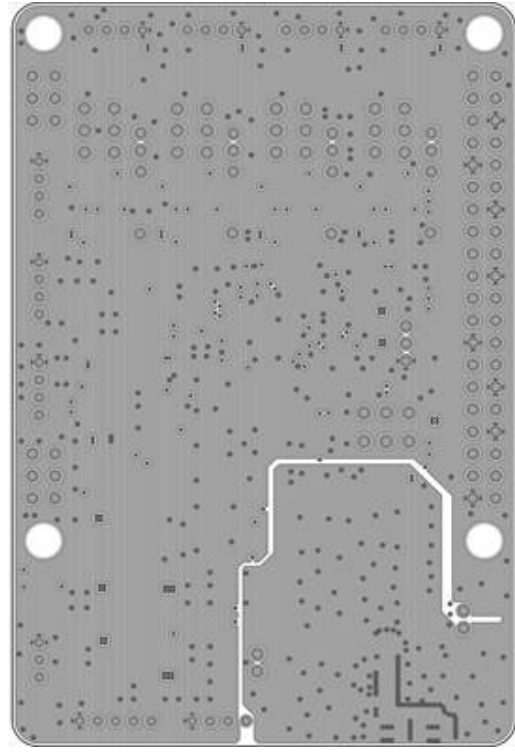
<그림 3.44> DAQ PCB b-silk



<그림 3.45> DAQ PCB t-silk



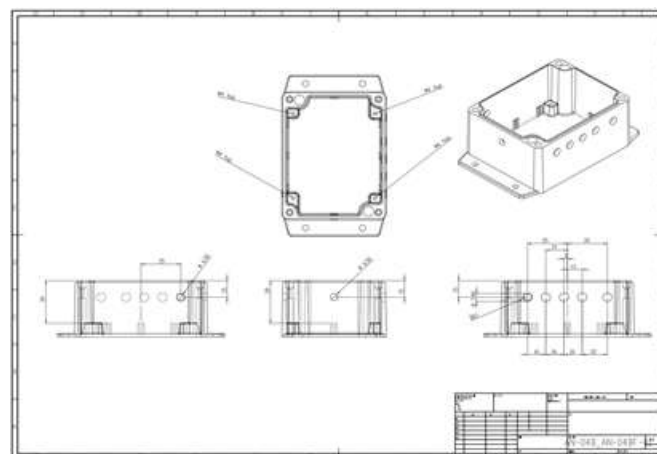
<그림 3.46> DAQ PCB Layer1



<그림 3.47> DAQ PCB Layer2

### ③ 연구3 : 내구성능을 갖는 센서노드 하우징 제작

- Test Bed 설치 대상이 외기 온도 변화가 심하며, 강우가 많은 해상 교량임을 고려하여, 하우징은 방수·방진이 가능하여야 하며, 전원, 안테나, 외부 센서 인터페이스 부분의 실링(sealing) 도 고려되어야 함.
- 본 과제에서는 해당 기준에 만족하는 미국 Polycase사의 하우징을 (모델명 : AN-04F, 재질 : Aluminum) 커스텀 가공하였으며, 제작도면은 그림 3.48과 같이 설계하였으며 주요 내용은 아래와 같음.
- 주요 제원
  - 크기 : 115.06 × 89.92 × 55.12 mm / 0.39 Kg
  - 방수·방진 등급 : IP67
  - 방수용 가스켓 포함
- 커스텀 가공
  - LoRa 안테나, 전원 연결, 외부 계측기 연결(Din 타입)을 위한 커스텀 가공

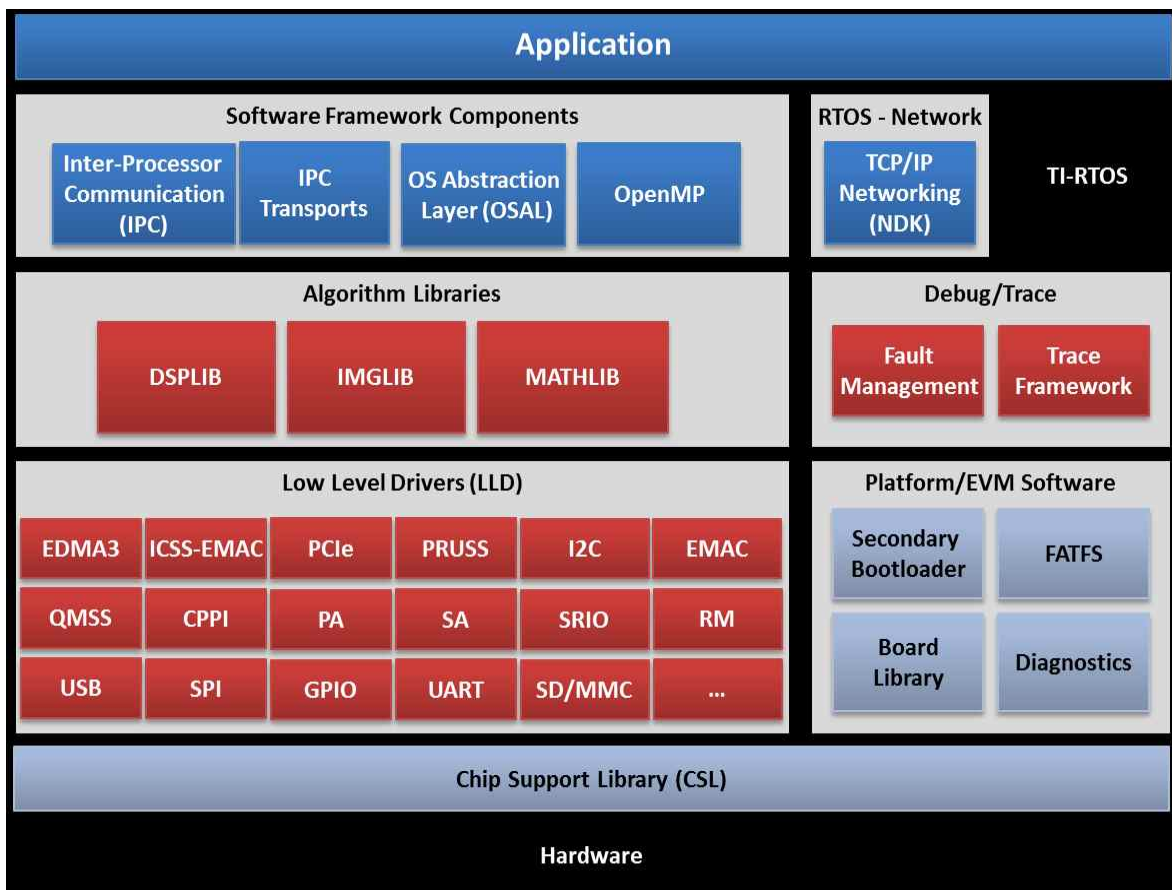


<그림 3.48> 하우징 커스텀 가공 설계도면

#### ④ 연구4 : LoRa 스마트센서노드/DAQ 펌웨어(Firmware) 개발

##### ㉠ 개요

- 1, 2차년에서는 Linux 범용 운영체제를 기반으로 개발이 이루어졌으나, 저비용·저전력이 가능한 시스템을 위해서는 기존 개발된 Linux 운영체제는 시스템 구현에 드는 개발 소요시간은 줄일 수 있지만, 범용 운영체제의 특성상 시스템 구현에 드는 자원(Resource)의 요구사항이 큰 편임.
- RTOS(Real Time Operating System: 실시간 운영체제)는 실시간 어플리케이션을 위해 개발된 운영체제임.
- RTOS 구조는 그림 3.49와 같으며, 운영체제 기능 중에 CPU 시간관리 부분에 초점을 맞춰서 설계되어 프로그래머가 프로세스 우선순위 설정 및 더 많은 제어를 할 수 있어 리소스 관리의 최적화가 가능함.



<그림 3.49> RTOS 구조

##### ㉡ Firmware 설계

- LoRa 스마트센서 노드는 RTOS 중 하나인 FreeRTOS의 운영체제로 개발되었으며, FreeRTOS는 오픈소스 기반의 무료로 사용할 수 있고, 통상적으로 수십 Kbyte 내외에서 Application 구현이 가능
- LoRa 스마트센서노드는 가속도계 센서보드 혹은 DAQ 보드와 동시에 작동하고 이를 위한 패키지는 그림 3.50~3.51과 같이 설계하였음.

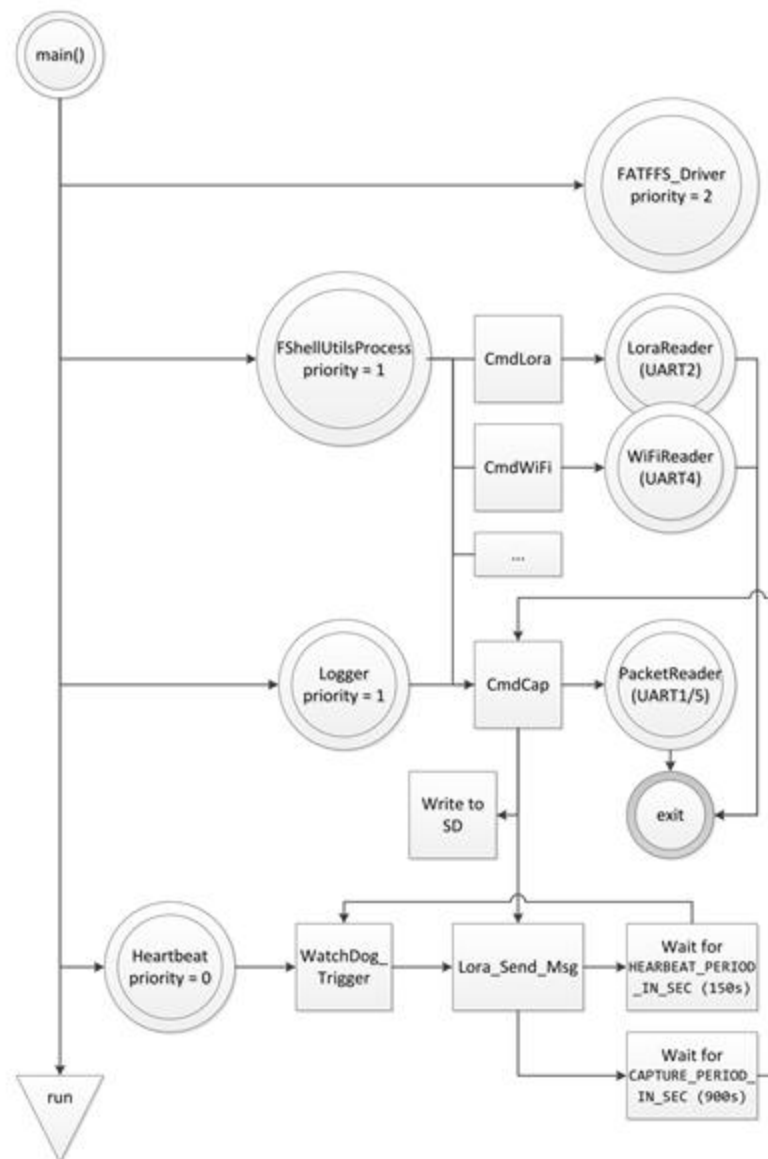
| 항목     | 세부항목   | 형식     | 크기(Bytes)                             | 단위     | 설명                            |
|--------|--------|--------|---------------------------------------|--------|-------------------------------|
| 헤더     | -      | Uint16 | 2                                     | -      | BABAh                         |
| ID     | -      | Uint16 | 2                                     | -      | 패킷 ID(1씩 증가)                  |
| 가속도계1  | X      | Float  | 4                                     | g      | ADXL355-X                     |
|        | Y      | Float  | 4                                     | g      | ADXL355-Y                     |
|        | Z      | Float  | 4                                     | g      | ADXL355-Z                     |
| 가속도계2  | X      | Float  | 4                                     | g      | LIS3DHH-X                     |
|        | Y      | Float  | 4                                     | g      | LIS3DHH-Y                     |
|        | Z      | Float  | 4                                     | g      | LIS3DHH-Z                     |
| 온도센서   | -      | Float  | 4                                     | °C     | 섭씨                            |
| GPS    | Lat    | Double | 8                                     | degree | 경도 도 단위(도/분/초 아님)             |
|        | Lon    | Double | 8                                     | degree | 위도 도 단위(도/분/초 아님)             |
|        | Alt    | Float  | 4                                     | meter  | 고도 해수면 대비 미터                  |
|        | Status | Uint16 | 2                                     | -      | 0000h                         |
| 체크섬    | -      | Uint16 | 2                                     | -      | [헤더포함 16-bit sum]과 FFFFh의 XOR |
|        |        |        |                                       |        |                               |
| 통신 특성  | 값      | 단위     | 비고                                    |        |                               |
| 패킷 크기  | 56     | Bytes  | 자동계산                                  |        |                               |
| 발생 빈도  | 125    | Hz     | 20190824 업데이트(ODR=125Hz, LPF=31.25Hz) |        |                               |
| 통신 속도  | 115200 | bps    |                                       |        |                               |
| 통신 점유율 | 60.8%  |        | 자동계산                                  |        |                               |

<그림 3.50> 통합 가속도보드 패킷 설계

|             |        |      |                                  |           |                                  |    |                                  |                                  |                 |    |                 |    |
|-------------|--------|------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|----|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|----|-----------------|----|
| Byte Order  | 1      | 2    | 3                                | 4         | 5                                | 6  | 7                                | 8                                | 9               | 10 | 11              | 12 |
| Field_Name  | Header |      | Target ID                        | Source ID | Payload Length                   |    | Sensor-1 Meas                    |                                  | Sensor-2 Meas   |    | Sensor-3 Meas   |    |
| Field_Value | 0xAA   | 0x41 | 0                                | 11        | 24                               |    | 1st sensor data                  |                                  | 2nd sensor data |    | 3rd sensor data |    |
| D-Type      | u16    |      | u8                               | u8        | u16                              |    | u16                              |                                  | u16             |    | u16             |    |
|             |        |      |                                  |           |                                  |    |                                  |                                  |                 |    |                 |    |
| Byte Order  |        |      | 13                               | 14        | 15                               | 16 | 17                               | 18                               | 19              | 20 | 21              | 22 |
| Field_Name  |        |      | Sensor-4 Meas                    |           | Sensor-1 Converted               |    |                                  | Sensor-2 Converted               |                 |    |                 |    |
| Field_Value |        |      | 4th sensor data                  |           | Temperature Value of 1st Channel |    |                                  | Temperature Value of 2nd Channel |                 |    |                 |    |
| D-Type      |        |      | u16                              |           | IEEE 754 Float Point             |    |                                  | IEEE 754 Float Point             |                 |    |                 |    |
|             |        |      |                                  |           |                                  |    |                                  |                                  |                 |    |                 |    |
| Byte Order  |        |      | 23                               | 24        | 25                               | 26 | 27                               | 28                               | 29              | 30 | 31              | 32 |
| Field_Name  |        |      | Sensor-3 Converted               |           |                                  |    | Sensor-4 Converted               |                                  |                 |    | Checksum        |    |
| Field_Value |        |      | Temperature Value of 3rd Channel |           |                                  |    | Temperature Value of 4th Channel |                                  |                 |    | 16-bit sum      |    |
| D-Type      |        |      | IEEE 754 Float Point             |           |                                  |    | IEEE 754 Float Point             |                                  |                 |    | u16             |    |

<그림 3.51> DAQ 보드 패킷 설계

- FreeRTOS 기반의 스마트센서노드의 운영체제는 부트로더(Boot Loader)와 싱글 어플리케이션 형태로 동작함.
- 어플리케이션은 펌웨어 및 데이터 로깅을 위한 파일시스템 드라이버, UART 인터페이스를 통한 LoRa 모듈과 Wifi 모듈 Reader와 센서보드 및 DAQ로부터의 데이터 Packet Reader, CLI(Command Line Interface)를 통한 LoRa Send Message, 주기적인 상태신호를 송출하는 형태임.
- 각 모듈에 Dead Lock 상태이면 자동 리셋하는 Watch Dog 등의 여러 태스크(task)로 구성되며, 본 과제에서 구현한 어플리케이션의 Task Diagram은 그림 3.52와 같음.



<그림 3.52> 어플리케이션의 Task Diagram

## ⑤ 연구5 : Test Bed 설치 및 장기 모니터링

### ㉠ 개요

- 본 과제를 통해 개발된 LoRa IoT 기반의 교량 모니터링 시스템의 검증을 위한 Test Bed는 그림 3.53과 같이 전라남도 영광군에 소재한 영광대교에 설치되었으며, 각 계측 단말로부터 LoRa 무선 신호 수집을 위한 LoRa 게이트웨이와 게이트웨이로부터 서버까지 데이터 전송을 위한 LTE라우터가 영광대교 계측동에 설치되었음.

- 영광대교에서 무선 자동 계측을 위한 스마트센서노드는 케이블 장력계 2개, 보강거더 고유진동수 해석을 위한 가속도계 1개, 온도계 2개, 신축변위계 2개를 설치하였음.
- 테스트베드 영광대교 제원
  - 상부구조형식 : 콘크리트 사장교
  - 하부구조형식 : Y형 교각
  - 길이 : 590 m
  - 폭 : 16.8 m
  - 높이 : 22.0 m
  - 설계하중 : DB-24
  - 최대경간장 : 320m



<그림 3.53> 테스트베드 영광대교 전경

#### ㉞ LoRa 게이트웨이

- LoRa 게이트웨이는 그림 3.54와 같이 캐나다 Tektelic 社의 KONA Macro IoT 게이트웨이를 사용하였으며 주요 특징 및 제원은 아래와 같음.



<그림 3.54> Tektelic KONA Macro IoT 게이트웨이

- 주요특징
  - KR920-923 ISM Band
  - 16 Rx / 2 Tx
  - Integrated Bandpass Filter
  - 27dBm Tx Power
- 주요 제원
  - 전력 소모 : < 12W

- 동작 온도 :  $-40^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$
- 동작 습도 : 10% ~ 100%
- 방수/방진 등급 : IP67
- 크기 :  $144 \times 282 \times 92 \text{ mm}$
- 무게 : 2.6 Kg
- Network : DHCPv4 client
- 게이트웨이 설치
  - 게이트웨이 본체는 그림 3.55와 같이 계측동 내부에 설치하되, 게이트웨이 안테나는 신호감도를 고려하여 계측동 외부에 안테나 익스텐션(extension)을 통해 설치함.



(a) 계측동 내부 게이트웨이 본체 설치



(b) 계측동 내부 LTE 라우터



(c) 게이트웨이 안테나 익스텐션 설치



(d) 계측동 외부 안테나 설치

<그림 3.55> 게이트웨이 설치

#### ㊤ LTE 라우터

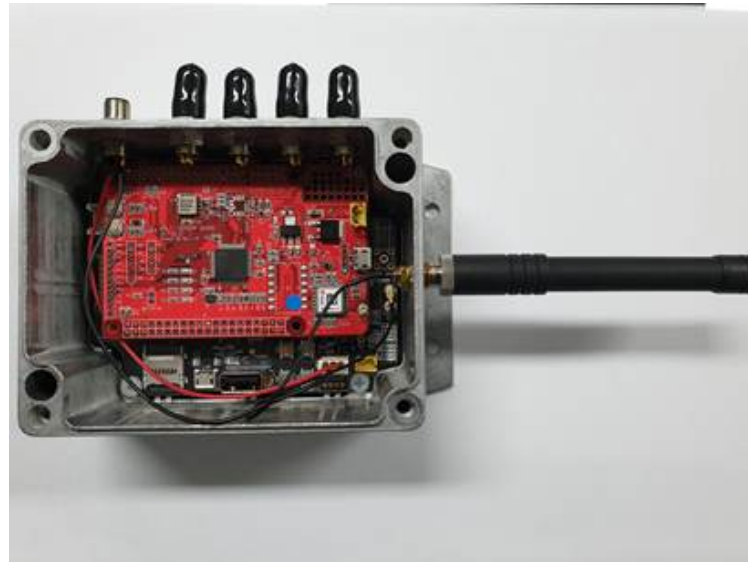


<그림 3.56> LTE 라우터

- LoRa 게이트웨이에 수집된 데이터를 클라우드 서버로 전송하기 위해, 기존 구축된 계측시스템 네트워크에 영향을 주지 않도록 그림 3.56과 같이 별도의 LTE라우터를 통하여 서버까지 데이터를 전송하도록 함.

㉔ 케이블장력계 설치

- 케이블장력계는 2차년도에 개발된 MEMS기반 통합센서보드와 LoRa 스마트센서노드 조합으로 그림 3.57과 같이 구성되며, 내장된 3축 가속도계를 통해 125Hz의 샘플링 주파수로 연직 방향(z-axis) 가속도를 측정(10~15분)함.
- 고유진동수 분석을 위하여 10분간의 가속도 측정 후 스마트센서노드에서 FFT (Fast Fourier Transform)분석을 하여, 가속도 Raw data와 FFT결과를 스마트센서노드 내부에 설계된 Micro SD에 저장되도록 설정함.



<그림 3.57> LoRa기반 스마트 센서노드 시제품

- 이후, Auto Peak Picking 과정을 통해서 얻은 각 모드별 고유진동수와, 제공된 각 케이블의 제원을 이용하여 해당 케이블의 장력을 산출함.
- 케이블장력계의 전원은 그림 3.58과 같이 기존 설치된 케이블장력계를 위한 전원 함체의 DC 12V 전원을 공유하도록 하였으며, 전원 연결 후 약 0.1V 정도의 전압 강하가 발생하였지만 기존 케이블장력계와 새로 설치한 케이블장력계 모두 정상 동작되는 것으로 확인함.



<그림 3.58> 케이블 장력계 DC 12V 전원 연결

- 케이블 장력계는 실외환경에서 설치가 되므로 센서보드와 스마트센서노드는 그림 3.59의 (a)~(b)와 같이 IP67 방수·방진 하우징으로 알루미늄 재질의 Pole mount를 제작하여 그림 3.59와 (c)~(d)와 같이 영광대교 케이블에 설치 고정함.



(a) 케이블 고정용 Pole mount



(b) 센서노드 하우징과 Pole mount 연결



(c) 케이블 장력계 설치

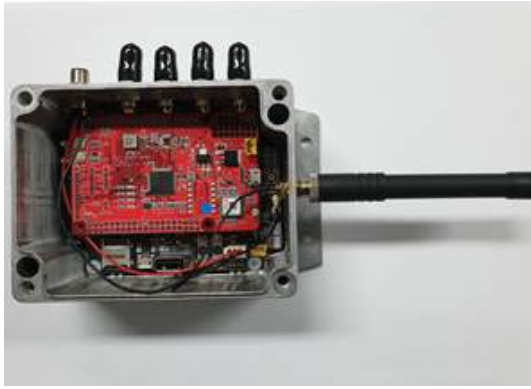


(d) 설치된 케이블 장력계

<그림 3.59> 케이블 장력계 설치

#### ㉞ 보강거더 가속도계 설치

- 보강거더의 고유진동수 분석을 위해 보강거더 내부에 그림 3.60과 같은 스마트센서노드를 설치하였으며, 전원 연결은 보강거더 내부의 상시전원을 연결할 수가 없어 그림 3.61과 같이 대용량 배터리를 연결하여 계측하였음.
- 3축 가속도계를 그림 3.62와 같이 보강거더 내부에 설치 후 연직 방향(z-axis)뿐만 아니라, 종/횡방향 (x, y axis) 가속도까지 동시에 계측하도록 동작시키며, 그림 3.63과 같이 안테나의 수신감도 저하방지를 위해 연장선을 통하여 보강거더 내부의 배수구를 통해 외부에 노출되도록 안테나를 설치함.



<그림 3.60> 보강거더에 설치된  
LoRa 3축 가속도계 내부



<그림 3.61> 3축 가속도계와  
배터리/안테나 연결



<그림 3.62> 보강거더에 3축 가속도계  
고정 설치



<그림 3.63> 보강거더내 배수구를 통한  
안테나 외부 노출

㉞ 온도계 및 신축변위계 설치

- 온도계와 신축변위계는 그림 3.64와 같이 영광대교 시점부, 종점부에 각각 1개소에 설치하였으며, 온도계와 신축변위계는 그림 3.65와 같이 연결되어 계측신호를 LoRa 스마트센서노드를 통하여 게이트웨이로 전송되는 형태임.



<그림 3.64>RTD 온도센서 설치



<그림 3.65> RTD 온도계 및 신축변위계 연결

- 
- RTD 온도센서는 그림 3.66과 같으며, 온도센서의 세부내용은 아래와 같음.
  - 모델 및 사양
    - RTD 온도센서(한국센서기술)
    - 측정 온도 범위 :  $-200\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$
    - 허용오차 :  $\pm 0.152^{\circ}\text{C}/1^{\circ}\text{C}$
  - 측정 방법 및 주기 : 1분당 10번 sampling 후 median-average 값 전송
  - 설치 위치 및 설치 수량 : 시점부 교대, 종점부 교대 각각 1개소 설치



<그림 3.66> RTD 온도센서

- 신축변위계는 그림 3.67과 같으며, 상세제원은 아래와 같음.
- 모델 및 사양
  - 모델 : PT430
  - Output :  $4\sim 200\text{ mA}$
  - Range :  $2\sim 100\text{ cm}$
- 측정 방법 및 주기 : 1분당 10번 Sampling 후 median-average값을 전송



<그림 3.67> PT420 신축 변위계

- 신축변위계 설치
- 교량 시점부, 종점부에 설치된 온도계와 신축변위계의 측정 신호들은 LoRa 기반 DAQ에서 신호가 수집.
- 신축변위계 설치는 그림 3.68~3.69와 같은 방식으로 기존 설치되어 있는 신축변위계 근처에 한 쪽 교대에 고정 후 연결하고, 스테인레스 파이프 2개 이용하여 보호덮개를 적용함.

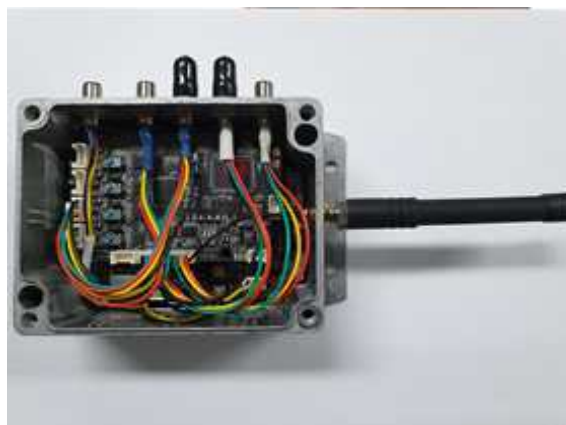
- 온도계의 출력형식은 저항타입이며, 신축변위계의 출력형식은 전류타입임.
- LoRa 기반 DAQ는 그림 3.70과 같으며, 공급되는 전원은 기존 계측기를 위한 합체에서 AC 220V 전원을 DC 12V 변환 후 LoRa 기반 DAQ는 그림 3.71과 같이 측면 DIN 타입 커넥터를 통해서 공급.
- LORa기반 DAQ는 기존 계측시설을 위한 합체 주위에 실리콘을 통해 가압적 안테나의 신호방해가 되지 않도록 설치.



<그림 3.68> 신축변위계 설치



<그림 3.69> 신축변위계 설치 완료



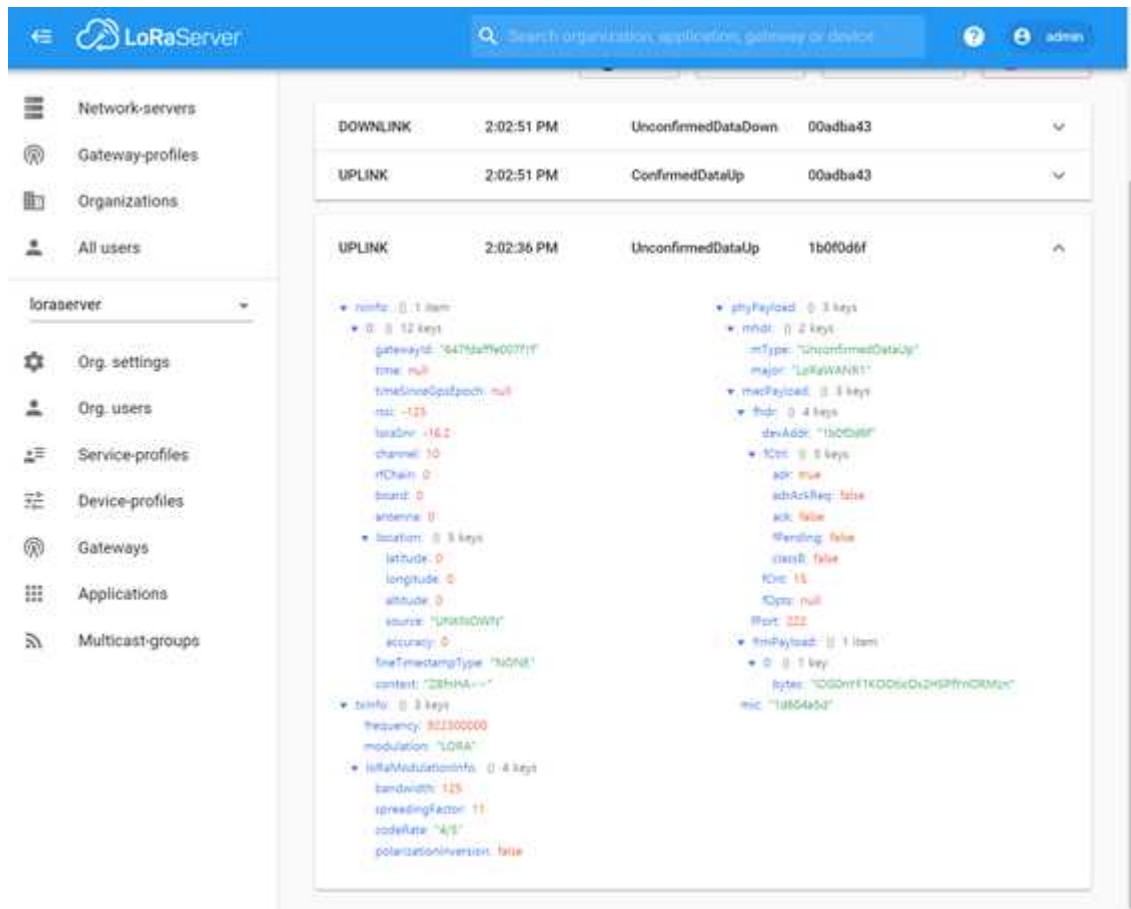
<그림 3.70> LoRa 기반 DAQ 내부



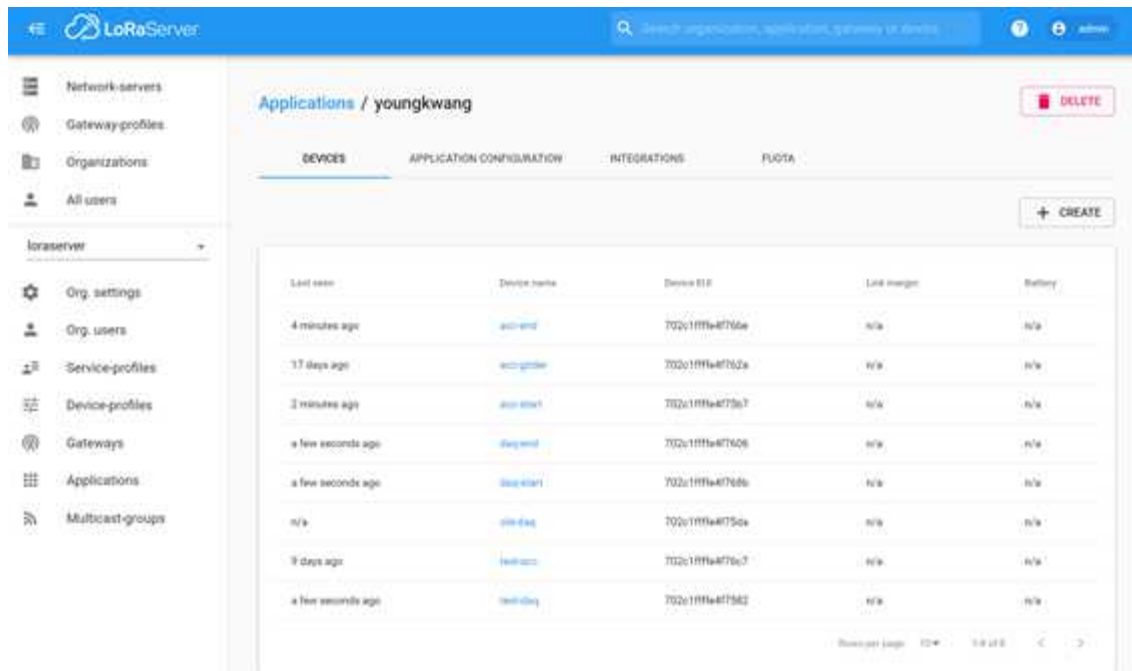
<그림 3.71> LoRa 기반 DAQ 측면 커넥터

#### ㊤ LoRa 네트워크 및 어플리케이션 서버

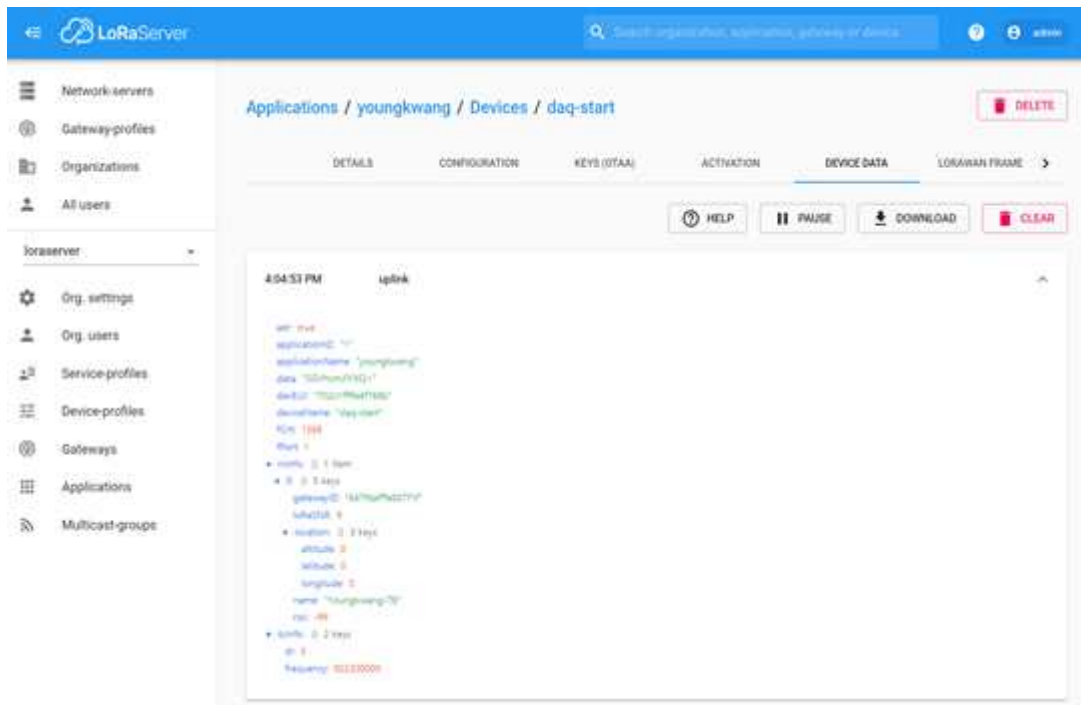
- LoRa 네트워크 및 어플리케이션 서버는 오픈소스 기반의 Chirp Stack Open Source LoRaWAN Network 서버를 기반으로 시스템은 Gateway Bridge, Network Server, Application Server로 구성되어 있으며, 그림 3.72~3.74와 같음.
- Gateway Bridge : LoRaWAN Gateway 들의 통신을 다루며 LoRa Packet Forwarder 프로토콜을 JSON data format 으로 변환하며 UDP 통신으로 이루어지며, MQTT broker로 연결.
- Network Server : LoRa Gateway 로부터 수신된 신호의 인증(Authentication), 중복 관리(de-duplication), Application Server 와의 통신과 Downlink 신호의 일정관리 등을 담당.
- Application Server : 각 LoRa 단말들로부터의 Join request를 처리하며, 각 단말의 Payload 데이터의 Encryption을 담당.



<그림 3.72> LoRa Application Server Gateway Live Data Packet



<그림 3.73> LoRa Application Server 단말 device 관리



<그림 3.74> LoRa Application Server Device Live Packet(DAQ-Start)

㉠ LoRa 기반 모니터링 시스템의 무선 네트워크 특성

- ISM 대역

- LoRa는 비면허대역인 ISM(Industrial Scientific and Medical Band) 대역을 사용하며 전기통신 이외에 산업용, 과학용, 의료용, 가정용 등의 용도로 한정된 장소에서 사용하는 설비 또는 장치의 운용을 위한 대역임
- 이 주파수 대역에서는 상호 간섭을 통한 공동 사용을 전제로 하고, 간섭의 최소화를 위해 소출력을 기본으로 함.
- 국내에서는 902~928 MHz(26 MHz) ISM 대역을 사용하며, 과학기술정보통신부령 제1호 무선설비규칙(2017년 7월 26일)을 준수함.

- LoRa KR920-923 Regional Parameter

- 국가별로 상이한 ISM대역 사용으로 국가별로 LoRa통신 사용을 위한 환경이 다르며, 국내에서는 KR920-923 Regional Parameter를 따름.
- LoRa 통신이 사용가능한 ISM 밴드 채널 주파수는 표 3.17과 같음.

<표 3.17> KR920-923 Central Frequency, bandwidth, maximum EIRP Output

| Center Frequency<br>(MHz) | Bandwidth<br>(kHz) | 최대출력(Max. EIRP) (dBm) |       |
|---------------------------|--------------------|-----------------------|-------|
|                           |                    | 단말                    | 게이트웨이 |
| 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 |

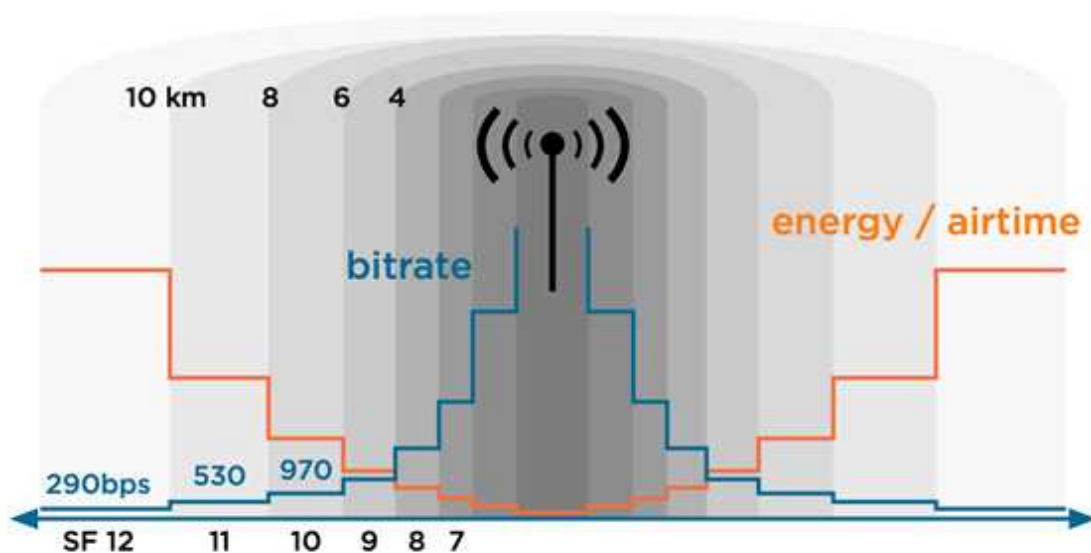
- ADR(Adaptive Data Rate)

- Test Bed 구축을 통해서 총 5개의 LoRa 스마트 센서노드 단말이 설치되었으며, 각각의 단말들은 그림 3.75와 같이 신호세기(SF: Spreading Factor)에 따라 전송률(DR: Data Rate)을 조정하는 ADR(Adaptive Data Rate) 특성을 가지며, LoRa의 한국 표준인 KR920-923 Regional Parameter에 따르면, SF에 따른 데이터 전송률은 표 3.18과 같음.

<표 3.18> LoRa KR920-923 Tx Data Rate

| 전송률 (Data Rate) | 신호세기        | 전송률 (bit/s) |
|-----------------|-------------|-------------|
| DR0             | SF12/125kHz | 250         |
| DR1             | SF11/125kHz | 550         |
| DR2             | SF10/125kHz | 980         |
| DR3             | SF9/125kHz  | 1760        |
| DR4             | SF8/125kHz  | 3125        |
| DR5             | SF7/125kHz  | 5470        |

- ADR에 따른 최대 payload 크기



<그림 3.75> LoRa ADR(Adaptive Data Rate) 특성

- LoRa의 경우 Data Rate에 따라 무선신호에 실을 수 있는 payload 크기가 변하며, 표 3.19와 같이 KR920-923 Regional Parameter에 정의되어 있음.

<표 3.19> LoRa KR920-923 Maximum Payload size

| Data Rate | Maximum Payload Size(bit) |
|-----------|---------------------------|
| 0         | 59                        |
| 1         | 59                        |
| 2         | 59                        |
| 3         | 123                       |
| 4         | 230                       |
| 5         | 230                       |

- Test Bed 각 센서노드의 무선 특성
  - Test Bed에는 총 5개의 LoRa 센서노드가 설치되었으며, 게이트웨이와 가장 먼 거리인 종점부에 설치된 센서노드는 게이트웨이와 약 1Km 내외임
  - 가장 먼 거리에 설치된 종점부에 설치된 센서노드를 포함하여 표3.20과 같이 신호감도는 모두 최소 120 dBm의 신호세기를 유지하고 있으며, 최소 DR4의 전송률을 안정적으로 유지함.
  - 게이트웨이로부터 가장 거리가 멀고 거더 콘크리트 구조물로 인하여 전파 환경이 가장 좋지 않은 종점부의 교대 하단 DAQ-End 의 경우에도 평균 Rssi(Receiving Signal Strength Indicator) 값이 120dBm, data rate 은 DR4, DR5를 유지하였음.

<표 3.20> 설치된 테스트베드 센서노드 신호감도 및 Data Rate

| LoRa 센서노드        | 평균 rssi(dBm) | LoRa Date Rate |
|------------------|--------------|----------------|
| acc-start(시점부)   | 85           | 5              |
| acc-end(종점부)     | 115          | 4,5            |
| acc-girder(거더중앙) | -            | -              |
| daq-start(시점부)   | 100          | 4,5            |
| daq-end(종점부)     | 120          | 4,5            |

- Test Bed LoRa 센서네트워크 송수신 성공률
  - LoRa LPWAN은 비면허 ISM대역을 사용하기 때문에, 간섭이 발생할 수 있고, 신호가 성공적으로 수신되지 않을 수도 있음.
  - Ferran 등에 따르면 페이로드(payload)의 크기, 단일 네트워크를 구성하는 단말의 개수에 따라 수신 성공률이 차이를 보이며 페이로드의 크기가 클수록, 단말의 개수가 클수록 수신 성공률이 떨어지며 수신 성공률은 LoRa 모듈의 Confirmed, Unconfirmed 두가지 전송 모드에 따라서도 차이를 보임.

- Test Bed에서는 Confirmed 전송 모드를 채택하여, 전송 실패시 계속 전송을 시도하도록 하였으며, 표 3.21과 같이 시점부, 종점부 DAQ 단말에서 각 1,000 개의 계측 데이터를 송신했을 때, 수신 성공률을 제시하였음.
- 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 판단됨.

<표 3.21> 시종점부 DAQ단말의 계측Data 성공수신율

| Number of Trans. Trial | DAQ(start)     | DAQ(end)      | Average        |
|------------------------|----------------|---------------|----------------|
| 1st                    | 914<br>(91.4%) | 920<br>(92%)  | 917<br>(91.7%) |
| 2nd                    | 65<br>(0.65%)  | 61<br>(0.61%) | 63<br>(0.63%)  |
| 3rd                    | 5<br>(0.05%)   | 3<br>(0.03%)  | 4<br>(0.04%)   |
| 4th                    | 0<br>(0.0 %)   | 2<br>(0.02%)  | 1<br>(0.01%)   |
| 5th more               | 16<br>(0.1%)   | 14<br>(0.04%) | 15<br>(0.07%)  |
| Total                  | 1000           | 1000          | 1000           |

- Test Bed LoRa 센서네트워크의 정확도
  - LoRa 센서네트워크에서 수신데이터의 정확도는 전적으로 연결된 센서의 정확도에 따르며, 데이터 정확도 검증을 위해, 송신된 원시데이터는 LoRa 스마트센서노드의 SD-card 외부 저장장치에 기록하도록 하였고, Test Bed 결과를 통해 비교 결과, LoRa 무선 통신을 통해 저장장치에 데이터와 수신된 데이터는 정확하게 일치함.
- LoRa 센서네트워크의 동기화(synchronization) 처리
  - 다수의 센서로 이루어진 센서네트워크의 경우 각 센서의 동기화가 중요하며 LoRa 네트워크는 LoRa 게이트웨이로부터 다운링크에 Time TAG 가 포함되어 있어, 게이트웨이로부터의 수신된 표준시간으로 동기화가 가능하나 GPS 모듈을 장착한 경우에 가능하고, GPS모듈이 없는 게이트웨이는 표준시간에 대한 동기화가 어려움.
  - Test Bed에 사용된 Tektelic 게이트웨이는 GPS 모듈을 포함하고 있지 않아서 게이트웨이 다운링크를 통해 시간 동기화는 할 수 없기 때문에 LoRa 센서노드에 포함된 RTC(Real Time Clock)을 통하여 동기화를 수행함.
  - 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 필요함.

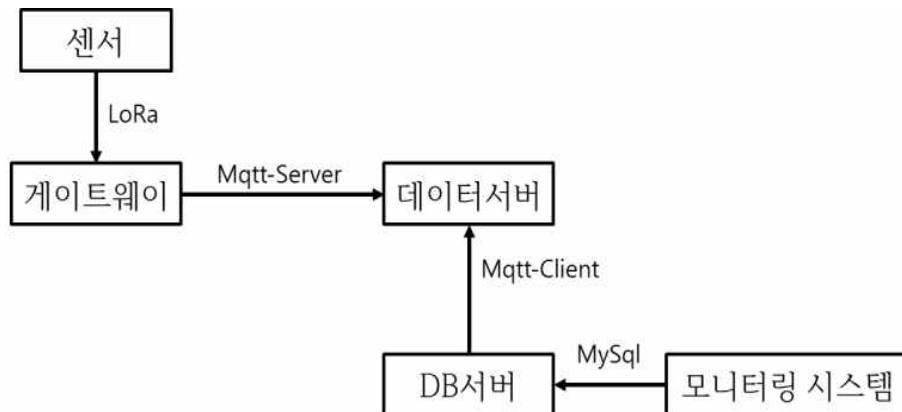
## ⑥ 연구6 : 모니터링 시스템 구축

### ㉓ 개요

- 본 연구에서 개발된 LoRa Network 및 Application Server에서 직접 계측 데이터를 저장하지 않고, 별도 구축된 모니터링 시스템에서 전송된 데이터를 취합·저장하여 Web Interface를 통한 사용자 모니터링이 가능하도록 구현됨.

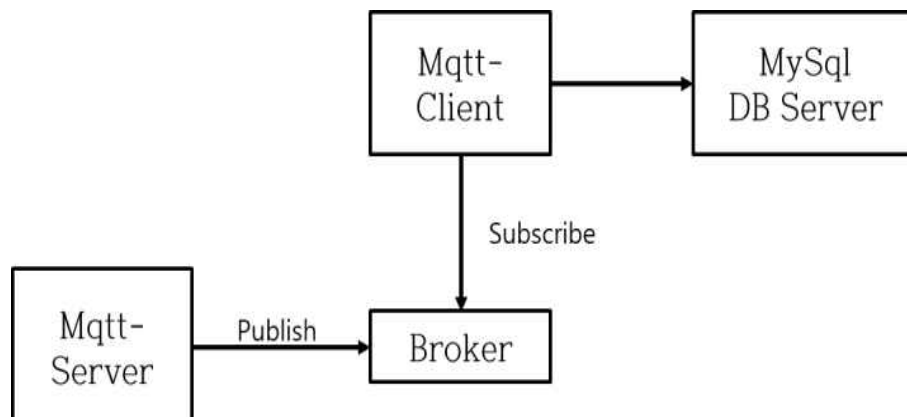
### ㉔ 통신 프로토콜 및 시스템 구성

- 모니터링을 위한 센서노드, 게이트웨이, LoRa 네트워크 및 어플리케이션 서버간의 통신을 위한 프로토콜 및 구축 환경은 그림 3.76과 같음



<그림 3.76> 모니터링 구축 시스템 데이터 흐름도

- MQTT(Message Queuing Telemetry Transport)
  - MQTT는 발행·구독 기반의 메시징 프로토콜이며, TCP/IP 프로토콜 위에서 동작함.
  - LoRa 어플리케이션 서버는 MQTT 프로토콜을 통해 LoRa 센서노드의 Upload Packet을 Topic으로 발행하고, 모니터링 시스템으로 이 Topic에 구독(Subscription)하여 수신된 Topic을 데이터베이스에 저장
  - Subscription을 통해 수신된 Upload Packet은 JSON 형태로 센서노드의 ADR setting, 타겟 어플리케이션, 디바이스 주소(device EUI), 이름, 수신 상태 및 암호화된 Payload로 구성.
  - MQTT Publish/Subscribe에 대한 구성과 그림 3.77과 같으며, MQTT를 통해 전달되는 Message는 JSON 프로토콜을 사용하며 내용은 그림 3.78과 같음.



<그림 3.77> MQTT Publish/Subscribe 개요

```

{
  "type": "uplink",
  "payload": {
    "adr": true,
    "applicationID": "1",
    "applicationName": "youngkwang",
    "data": "SGVhcmJlYXQ=",
    "devEUI": "702c1ffffe4f768b",
    "deviceName": "daq-start",
    "fCnt": 21879,
    "fPort": 1,
    "rxInfo": [
      {
        "gatewayID": "647fdafffe007f1f",
        "loRaSNR": 2.2,
        "location": {
          "altitude": 0,
          "latitude": 0,
          "longitude": 0
        },
        "name": "Youngkwang-TB",
        "rssi": -105
      }
    ],
    "txInfo": {
      "dr": 5,
      "frequency": 922100000
    }
  }
}

```

<그림 3.78> MQTT Publish/Subscribe 개요

㉔ 웹기반 모니터링 시스템

- 주요구성

- MQTT 프로토콜에서 전송, 가공된 데이터는 MySQL 데이터베이스에 저장하고, 저장된 데이터를 호출하여 웹상에 테이블, 그래프로 표출하기 위한 모니터링 시스템의 주요제원은 표 3.22와 같이 구성함.

<표 3.22> 웹기반 모니터링 시스템 주요제원

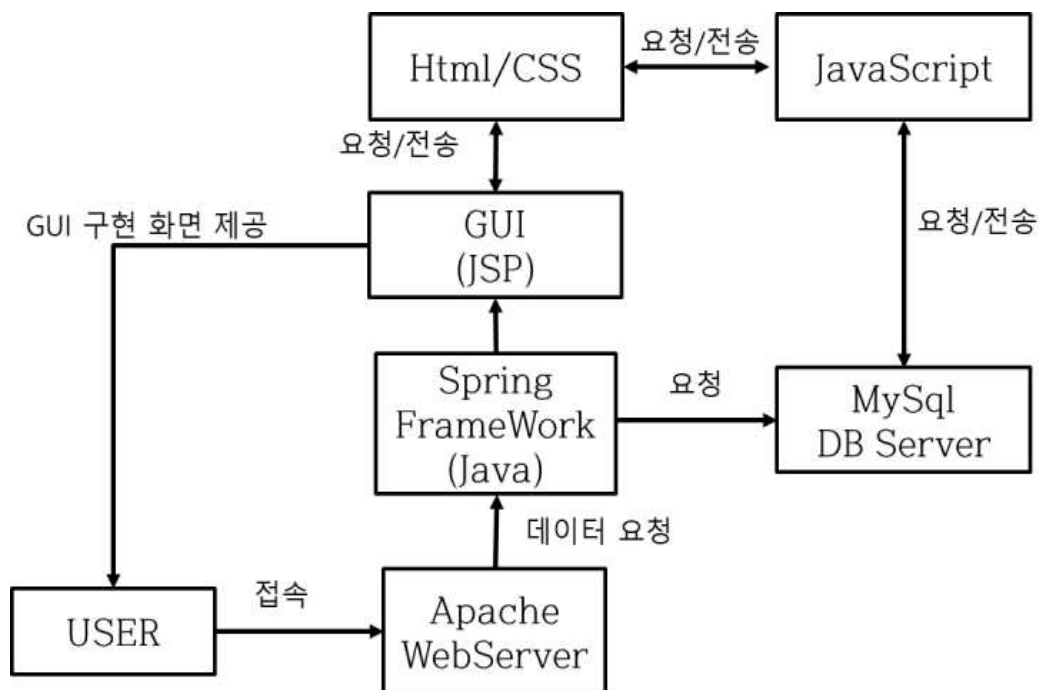
| 이름                  | 내용                        | 비고 |
|---------------------|---------------------------|----|
| Apache              | Web Server                |    |
| Spring FrameWork    | Web Application Framework |    |
| ApacheTomcat        | Web Application Server    |    |
| Ubuntu              | Server OS                 |    |
| Html/css/javascript | Web GUI 구성 언어             |    |

- 모니터링 Database Field / Type은 표 3.23과 같이 구성하여 적용함.

<표 3.23> 웹기반 모니터링 시스템 주요 필드 및 타입

| 필드명             | 타입          | 비고        |
|-----------------|-------------|-----------|
| applicationID   | int         | 센서 고유 ID  |
| applicaiionName | varchar(50) | 어플리케이션 이름 |
| deviceName      | varchar(50) | 센서노드 이름   |
| devEUI          | varchar(50) | 기기 고유 EUI |
| gatewayID       | varchar(50) | gatewayID |
| LoRaSnR         | double      | 통신 신호대잡음비 |
| data            | Varchar(50) | 센서 계측 데이터 |
| date            | datetime    | 센서 계측 시간  |

- 시스템 사용자가 URL을 통하여 접속하면 서버에서 호출된 데이터를 가공하여 테이블 및 그래프로 표출하도록 그림 3.79와 같이 웹기반 모니터링 시스템을 구성함.



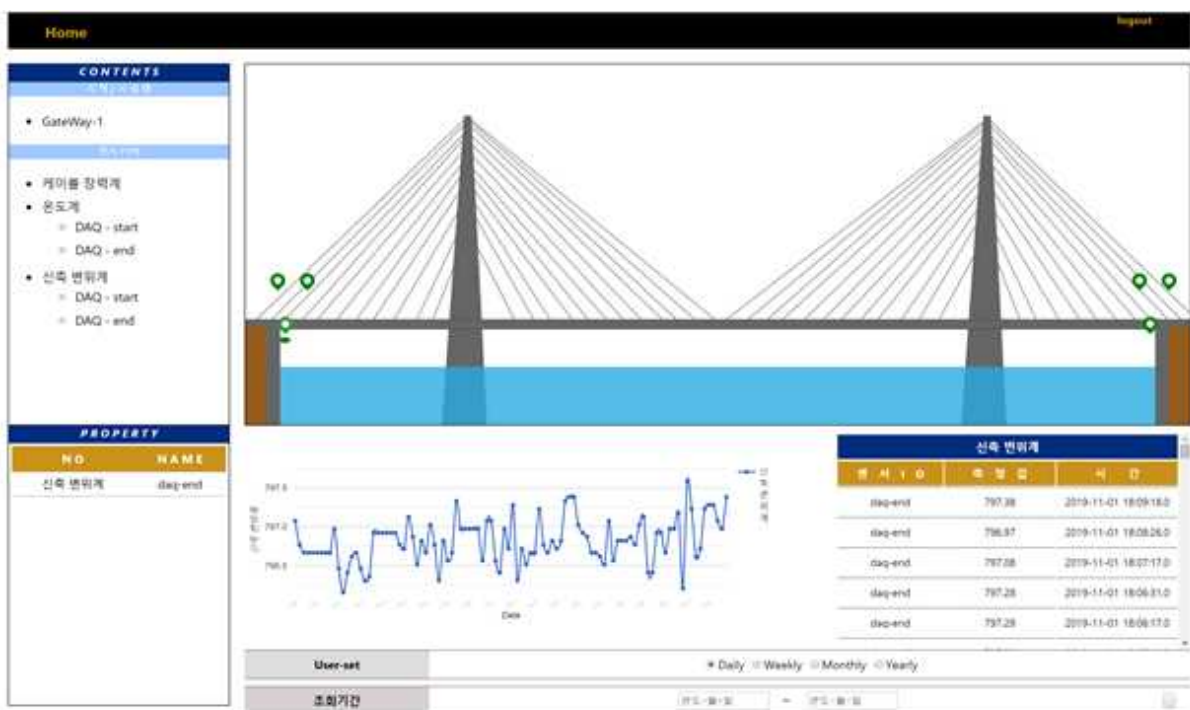
<그림 3.79> 웹기반 모니터링 시스템 구성

- 웹기반 모니터링 시스템 GUI(Graphic User Interface)

- 사용자는 시스템을 통하여 모니터링 대상이 되는 각 게이트웨이, 센서노드, 센서들에 대한 정보를 확인할 수 있음.
- 계측 데이터들의 경우 실시간 모니터링이 가능하도록 하였고, 시간, 일간, 주간, 월간, 연간 단위로 데이터를 확인할 수 있도록 시스템 구성되며, 모니터링 시스템의 GUI는 그림 3.80~3.81과 같이 구현함.



<그림 3.80> 모니터링 시스템의 온도 변화 Table 및 Graph

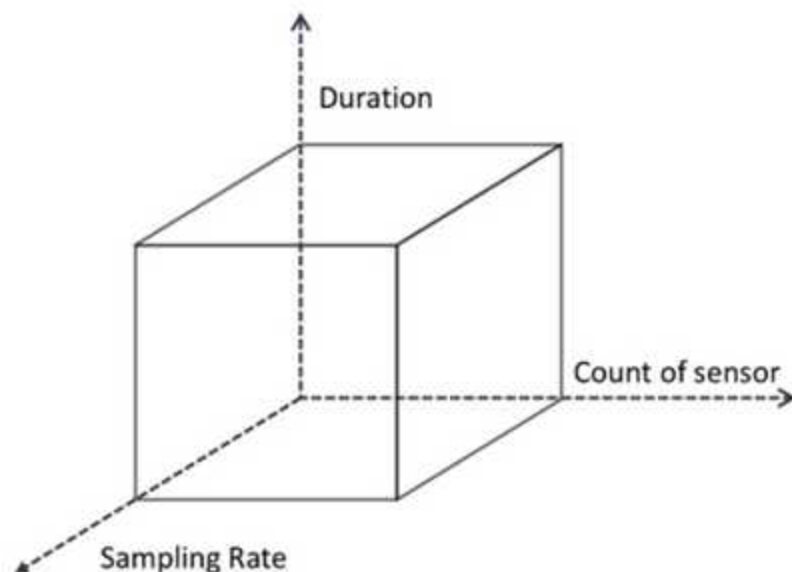


<그림 3.81> 모니터링 시스템의 신축변위 변화 Table 및 Graph

## ⑦ 연구7 : 사물인터넷(IoT) 기반의 교량 유지관리를 위한 Big Data 시스템

### ㉔ 개요

- IoT 기반의 계측 시스템은 가용한 모든 센서가 네트워크로 연결되고, 생성된 데이터 기반으로 인공지능 기술과 융합되어 자동으로 진단하고 동작하는 것을 궁극적인 목표로 하고 있음.
- 하지만 다수 센서에 수많은 데이터가 발생되어 기존 방식으로는 Data 처리가 현실적으로 불가능하며 전통적인 데이터베이스 시스템과 다른 사물인터넷(IoT) 기반의 시스템을 위한 데이터 처리 방안이 요구됨.
- 이러한 데이터 처리를 위해서는 Data 입력 및 저장속도가 빨라야하고, 고속으로 데이터를 추출하여야 하며, 고속의 시계열(time series) Query를 지원해야 함.
- IoT 단말은 통신과 데이터 처리를 담당하는 노드와 연결되는 각종 센서로 구성됨.
- 시스템이 확충됨에 따라 전체 시스템에 발생하는 데이터는 그림 3.82와 같이 시스템에 연결된 각 노드에 연결된 센서의 곱에 비례하여 기하급수적으로 늘어나고 어플리케이션의 필요에 따라 데이터의 샘플링 주기(Sampling Rate)가 더 짧아지거나, 데이터의 보존 기간은 늘어남.



<그림 3.82> 3차원 공간 부피만큼 발생하는 데이터의 총합

### ㉕ 기존의 전통적인 데이터 처리방법 : 관계형 데이터베이스(RDBMS)

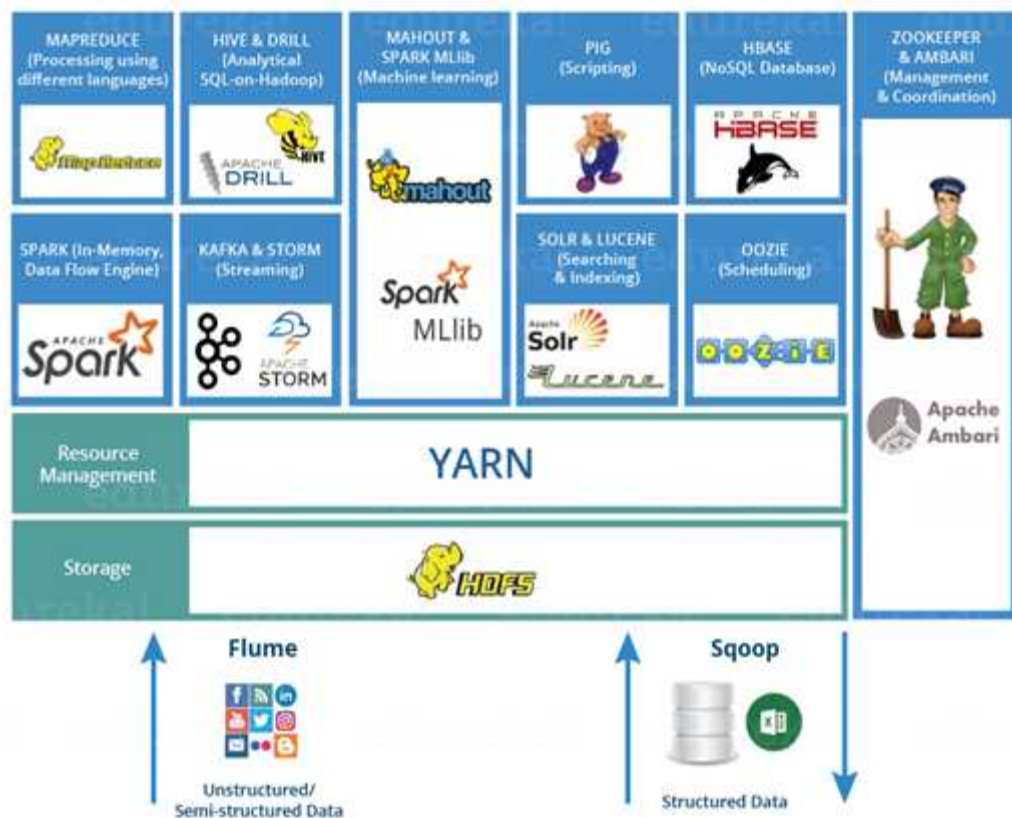
- 기존 전통적인 데이터처리 방법은 트랜잭션(transaction) 기반의 관계형 데이터베이스 시스템을 바탕으로 오라클(Oracle), MySQL, 포스트그레SQL(PostgreSQL), MS-SQL 등이 있으며, 거의 모든 분야에 데이터를 다루는 표준시스템으로 자리 잡고 있음.
- 하지만 RDBMS(Relational Database Management System)는 트랜잭션으로 Data 처리를 하기 때문에 기하급수적으로 늘어나는 IoT 기반의 Data를 다루기에 많은 제약사항이 발생됨.
- 트랜잭션(transaction)은 데이터베이스의 상태를 변환시키는 하나의 논리적 기능을 수행하기 위한 작업단위 또는 한꺼번에 모두 수행되어야 할 일련의 연산을 의미하며, RDBMS는 트랜잭션을 지원하기 위해 오버헤드가 발생되기 때문에 사물인터넷 기반의 데이터 처리에는 적합하지 않음.

- 연산복구 비용
  - 수행 중인 트랜잭션은 완벽하게 끝나거나, 수행되기 이전의 상태로 완벽하게 복원 되어야하기 때문에 RDBMS는 모든 트랜잭션의 변경 연산에 대해 로그(Log)라는 2차 저장매체에 기록을 수행.
  - 검색 성능을 높이기 위해 다양한 인덱스(index)를 생성하는데 이로 인해 입력 성능은 떨어지는 트레이드오프(Trade-Off)가 발생하며 RDBMS의 성능을 저하시키는 가장 중요한 이유 중 하나임.
- 잠금(Locking) 비용
  - 데이터베이스에서 하나의 트랜잭션은 다수의 테이블에 접근하고, 동시에 여러 건 수행되어야 함.
  - 이러한 환경에서 높은 동시성을 제공하고, 잠금으로 인한 교착상태(Deadlock)를 방지하기 위해 매번 모든 데이터 접근에 대해 Locking을 수행하게 되는데 이로 인하여 많은 비용이 발생됨.
- 비효율성
  - 일반화된 데이터 저장구조 및 인덱스 구조의 복잡성 때문에 RDBMS는 속도의 한계가 존재하여 개선하기 위한 노력을 하였으나 데이터베이스의 복잡한 구조로 진화되어 개선되기 어려운 상태임.
  - 이러한 구조적인 복잡성은 단순한 연산에 대해서도 복잡한 내부 로직을 수행할 수 밖에 없는 구조적인 한계를 갖고 있기 때문에 IoT 데이터의 입력 성능이 최대인 경우라도 초당 수천 건으로 제한될 수 밖에 없고, 저장된 대규모의 데이터에 대해 질의(Query)를 수행하면 반응 시간은 아주 길어짐.

㉔ IoT 기반의 Big Data를 다루기 위한 방안

- 이러한 전통적인 RDBMS의 IoT 데이터에 대한 제약을 극복하기 위해, 텍스트 파일 기반의 데이터베이스, 스플링크(Splunk), 일래스틱(Elastic)등과 같은 검색엔진 기반과 하둡(Hadoop) 그리고 NoSQL(Not Only SQL)등을 기반으로 하는 솔루션들이 시도 되고 있음.
- 하둡(Hadoop)기반 시스템
  - 하둡(Hadoop)은 대량의 자료를 처리할 수 있으며 컴퓨터 클러스터에 동작하고 분산 응용 프로그램을 지원하는 프리웨어 자바 소프트웨어 프레임워크임.
- 하둡(Hadoop) 구조(Architecture)
  - 하둡(Hadoop)은 여러 개의 하둡 공통 패키지로 구성되어 있으며, 하둡 파일시스템(HDFS : Hadoop File System), OS 수준 추상화(OS Level Abstraction), 그리고 맵리듀스(Map Reduce) 엔진이 포함되어 있음.
  - 소규모 하둡 클러스터에는 하나의 마스터(master)와 여러 워커(Worker)노드들로 구성되어 있음.
  - 마스터 노드들은 잡트랙커(Job Tracker), 태스크 트랙커(Task Tracker), 네임노드(Name Node), 데이터노드(Data Node)로 구성되며 슬레이브 또는 워커노드(Worker Node)는 데이터노드와 태스크트랙커로 동작됨.
  - 대용량 하둡 클러스터에는 HDFS가 파일시스템 인덱스를 관장하기 위한 네임노드 전담 서버를 통해 관리되며 2차 네임노드는 네임노드의 메모리구조 스냅샷을 만들어 파일시스템에 장애나 데이터의 손실을 줄여주며 단독 잡트랙커 서버는 작업 스케줄링을 관리함.

- 하둡 분산 파일 시스템(HDFS: Hadoop Distributed File System)
  - 하둡 분산 파일 시스템은 하둡 프레임워크를 자바 언어를 통하여 코딩된 분산 확장 파일 시스템이며 HDFS는 여러 기계에 대용량 파일들을 나눠서 저장하고 데이터들을 여러 서버에 중복해서 저장하여 데이터의 안정성을 얻음.
- HDFS의 주요기능
  - 하드웨어 오동작 : 하드웨어 수가 많아지면 일부 하드웨어가 오동작할 가능성이 발생되어 이러한 상황을 빠른 시간 내 자동으로 복구함.
  - 스트리밍(streaming) 자료 접근 : 범용 파일시스템과 달리 반응 속도보다는 시간당 처리량에 최적화에 우선순위를 둠.
  - 대용량 Data 집합 : 한 개의 파일이 기가바이트나 테라바이트 정도의 크기를 갖는 유형을 처리할 목적으로 설계되었으며, 자료 대역폭 출력이 높고, 하나의 클러스터에 수 백개의 노드를 둘 수 있다. 하나의 인스턴스에서 수천만 여 파일을 지원.
  - 간단한 결합 모델 : 한번 쓰고 여러 번 읽는 모델에 적합한 구조로 파일이 한번 작성되면 바뀔 필요가 없는 경우에 처리량을 극대화 할 수 있도록 함.
  - 자료를 옮기는 것보다 계산 작업을 옮기는 것이 비용이 적게 발생 (자료를 많이 옮기면 대역폭이 많이 들기 때문에 네트워크 혼잡으로 인하여 전체 처리량이 감소하며, 가까운 곳에 있는 자료를 처리하게 계산 작업을 옮기면 전체적인 처리량이 더 높아짐)
  - 다른 종류의 하드웨어와 소프트웨어 플랫폼과의 호환성 : 그림 3.83과 같이 서로 다른 하드웨어와 소프트웨어 플랫폼을 묶어 놓아도 상당한 호환성을 갖음.



<그림 3.83> 하둡 에코시스템(Hadoop Ecosystem)

㉔ 하둡 기반 시스템의 IoT 데이터 적용의 문제점

- 하둡(Hadoop)은 크롤링(crawling)으로 수집된 수백 TB(terabyte)가 넘어가는 크기의 웹문서의 인터넷 검색 서비스를 목표로 개발되었으며, 수집된 웹 문서를 모두 읽어 역인덱스(Inverted Index) 과정을 수행하여 역테이블(Inverted Table)로 구성되어짐.
- 하둡(Hadoop)은 Big Data를 다루는 가장 대표적인 데이터베이스 솔루션이나, 노드와 센서의 개수에 따라 기하급수적으로 늘어나는 IoT 기반의 데이터를 다루기에는 아래와 같은 문제점이 발생.
- 하둡은 최소 4대 이상의 클러스터로 구성되어야 함.
- 처리할 모든 데이터가 하둡 파일 시스템(HDFS : Hadoop File System)에 저장하도록 되어 있으며, 파일이 부분 변경이 불가능하기 때문에 정교한 데이터 처리를 위한 세밀한 파일 조작이 어려움.
- 데이터 분석을 위해 기본적으로 맵리듀스(Map Reduce)를 수행하게 되며, 이는 클러스터 준비시간에만 몇 초 이상의 시간이 발생.
- 단일 사용자 기준으로 모든 데이터를 검색하는 구조이며, 동시에 다수 사용자 쿼리를 처리하기가 어려움.
- 하둡 자체는 오픈소스 기반의 무료로 사용할 수 있는 시스템이지만, 유지보수나 기술지원에 많은 비용이 발생할 수 있음. (최소 10개 이상의 다른 오픈소스 시스템과 연동되며, 장애가 발생했을 때 빠른 시간 내 대처가 어려움)

㉕ 시계열(time series) 데이터베이스

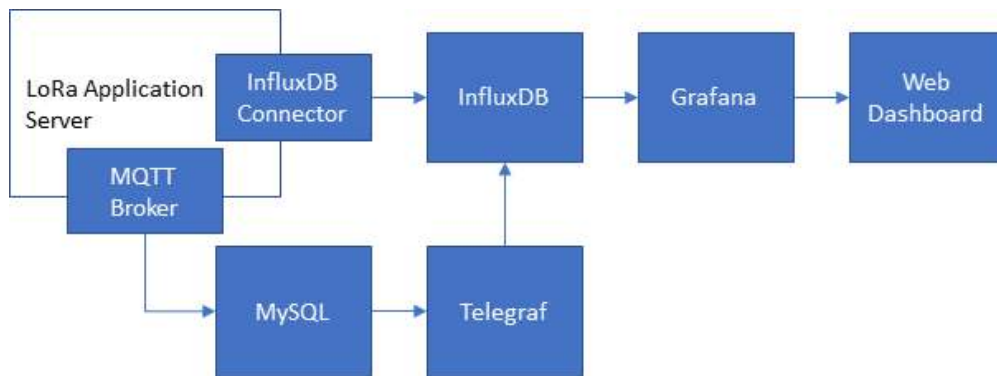
- 시계열 데이터를 다루기 위한 전용 데이터베이스 요구사항(Requirements)
- 데이터베이스는 거의 실시간으로 데이터를 흡수되어야 하며 일부 어플리케이션은 초당 수백만 혹은 수억 개의 데이터 포인트를 생성할 수 있으므로 데이터베이스는 생성된 양의 데이터 흡수를 처리할 수 있어야 함.
- 데이터베이스를 사용해서 모니터링하고 제어하려면 실시간으로 데이터베이스를 쿼리할 수 있어야 하며, 쿼리는 지속적으로 실행이 가능해야함.(범용 데이터베이스에서 쿼리는 스트리밍이 아닌 배치로 실행)
- 데이터베이스가 시계열 데이터 전용으로 설계된 경우 비교적 간단히 데이터 압축을 수행할 수 있음.
- 데이터를 흡수하는 만큼 빠르게 방출할 수 있어야함. (시계열 데이터는 일주일 또는 한 달과 같이 특정 기간 동안에만 필요하고 이후 버려도 되는 경우가 많다. 일반 데이터베이스는 이렇게 신속하게 데이터를 제거하도록 설계되지 않음)
- 전체가 아닌 일부 데이터를 제거하여 “다운샘플링(Down Sampling)”이 가능해야 함. (예를 들어 초 단위로 데이터 포인트를 수집하여 일정 기간 데이터의 높은 해상도 또는 샘플링 주기(sampling rate)를 유지해야 하며 일정경과 이후에는 대부분의 데이터를 제거할 수 있지만, 일정 부분은 높은 해상도로 보관해야할 필요가 있기 때문에 시계열 데이터는 초기에는 높은 해상도가 매우 중요하지만, 이후 장기간 보관을 위해서는 저해상도 데이터로도 충분한 경우가 많음.)
- 시계열 데이터베이스의 주요 특징
- 시간 처리에 최적화된 인덱스 지원 : 센서데이터가 가진 근원적인 문제는 전통적인 트리(Tree) 기반의 인덱스(Index)로는 필요한 성능을 제공하기 어렵기 때문에 최근 시계열 데이터베이스는 시간축으로 모여진 태그 아이디(Tag ID)마다 대량 데이터에 새로운 형태의 인덱스를 구성하여 문제를 해결하고 있음.

- SQL 기반 시계열 쿼리(Query) 지원 : 시계열 데이터베이스는 특정한 시간 영역에 해당하는 사용자의 분석 요구 사항을 잘 표현할 수 있는 쿼리(Query)를 보편적인 SQL 기반으로 동작하도록 설계되어 있어 기존의 데이터베이스 사용자가 쉽게 적용할 수 있도록 함.
- 초고속 데이터 입력 : 시계열데이터베이스는 기본적으로 고속으로 데이터를 입력할 수 있어야 함.
- 트랜잭션(transaction) 지원 불가 : 초고속 데이터 입력과 코드의 복잡성을 최소화하여 처리 성능을 높이기 위해 전통적인 데이터베이스의 특징 중의 하나인 트랜잭션(transaction) 기능을 지원하지 않음
- 연산변경 불가 : 센서에서 발생하는 시계열 데이터는 데이터의 변경을 요구하는 경우가 거의 발생하지 않으며, 데이터의 변조 가능성을 방지하기 위해 데이터 변경 연산을 지원하지 않음
- 실시간 데이터 압축 : 장기간 저장될 수 있는 시계열 데이터는 많은 디스크 용량이 요구되므로 저장공간의 효율화를 위해, 데이터베이스 엔진 내부에서 데이터를 압축하는 기능을 제공하고 있음.
- 롤업(Rollup) 기능 지원 : 시시각각 입력되는 데이터를 초/분/시간 단위로 별도보관되는 통계 데이터를 자동으로 생성하는 기능을 제공
- 스트림(Stream)연산 지원 : 고속의 센서 데이터를 실제 테이블에 입력하기 전 특정 조건을 통해 데이터를 변경, 이동할 수 있는 기능을 제공함. 한 번 입력되면 변경이 불가능한 제약 조건을 해결하는 것도 있지만, 입력된 데이터에 대한 선조치를 통해 실시간으로 환경에 대한 대응을 하려는 목적도 있음.
- 시계열 데이터베이스의 종류
  - 인플럭스 DB(Influx DB) : 2013년 미국에서 출시되었으며, 고(Go)언어 기반으로 개발되었으며 SQL과 유사한 쿼리 언어를 제공하며 다양한 프로그래밍 언어 인터페이스를 제공함.
  - 단일 노드에서 동작하는 제품은 무료로 제공되며, 다중 노드 지원을 위한 클러스터 버전의 경우에는 상용으로 구매하여야 함
  - 오픈TSDB : 2011년부터 개발이 추진된 가장 오래된 시계열 데이터베이스 제품이며, 오픈소스를 지향하고 개발언어가 자바(Java)를 기반으로 되어있어 다양한 개발 환경과의 유연한 연동이 가능함.
  - 프로메테우스(Prometheus) : 고(Go)언어 기반으로 개발된 오픈소스 데이터베이스이며, 자체 데이터베이스로 인식되기 보다는 다른 시계열 데이터베이스와의 연동을 통해 모니터링 솔루션 제공되고 있음.
  - 마크베이스(Machbase) : 국내에서 개발된 시계열 데이터베이스로, C언어 기반으로 현재 통합 보안 로그, 스마트 팩토리 센서 데이터 저장 및 처리를 위해 사용되고 있음.
- ㉠ IoT 기반의 교량 계측 데이터를 위한 Big Data 시스템 플랫폼 개발방안
  - 본 연구 과제를 통해서 설치된 센서네트워크는 교량의 구조 건전성 평가를 위해, 가속도계 기반의 케이블 장력계, 온도계, 신축변위계 등으로 데이터들은 시계열(Time series) 데이터이며, 향후 시스템이 확장되어도 계측데이터들의 시계열 특성은 변화하지 않을 것으로 보임.
  - 이러한 계측 Data의 특성을 고려하여 교량 등의 시설물 유지 관리를 위한 센서네트워크의 데이터 처리를 위해서는 하둡 기반 Big Data 시스템보다 시계열 데이터베이스 시스템이 우위를 가지는 것으로 파악됨.

- 따라서 본 연구에서는 기존 구축되었던 MySQL 기반의 RDBMS에서 Influx DB 기반의 시계열 데이터베이스 시스템으로 전환하며, 시계열 데이터의 모니터링과 분석에 용이한 Grafana 시스템과 연동하여 웹기반 모니터링 대시보드(dashboard) 구현을 주요 개발 목표로 설정함.

㉠ InfluxDB기반 Big Data 시스템 플랫폼 개발 주요 내용

- LoRa Application server에서 제공하는 Influx DB Connector를 통한 Integration을 통해, 계측데이터는 Influx DB로 전달되며, Grafana 대시보드를 통해 모니터링되며 모니터링 설계는 그림 3.84와 같음.
- Influx DB 구축 이전 MySQL 데이터베이스 저장 데이터는 InfluxDB 의 Telegraf 플러그인 (plug-in)을 통해 InfluxDB 로 전환됨.



<그림 3.84> InfluxDB 기반 데이터 모니터링 구조

- 구축된 InfluxDB 와 연동을 통해 그림3.85와 같이 모니터링 대시보드를 구현함.



<그림 3.85> InfluxDB 연동으로 구현된 Grafana 기반 모니터링 대시보드

(2) 한국시설안전공단 (공동연구기관)

① 연구1 : 교량 무선계측시스템 설치 및 유지관리 가이드(안) 제시

㉔ 연구배경 및 목적

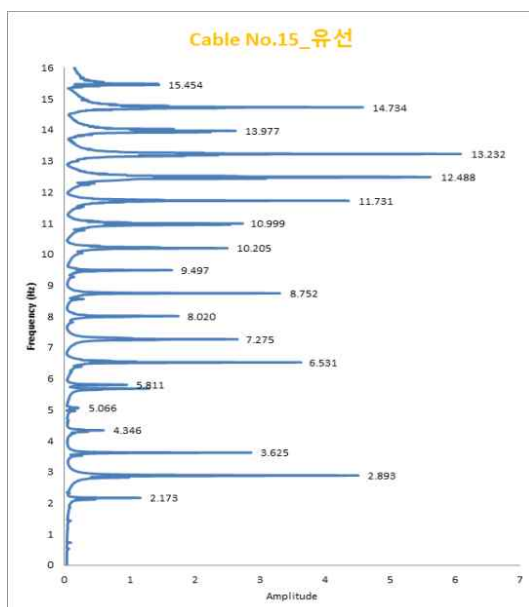
- 구조물의 노후화가 가속되고 있는 상황에서, 유지관리에 소요되는 비용은 점차 증가하여 20년 후에는 노후 구조물 유지관리 비용이 현재의 4배에 이를 것으로 분석되고 있음.
- 노령화로 인해 유지관리에 종사하는 젊은 기술자는 점차 감소할 전망이며 최근에는 육안점검 결과의 한계(접근이 어려운 부위의 점검 등)를 극복하고 기술자에 따른 점검 결과의 편차를 최소화하며, 4차 산업혁명 기술을 이용하여 점검/진단/성능평가에 소요되는 인력 및 비용절감 대안이 절실히 요구되고 있는 실정임.
- 이러한 요구에 대한 대안의 하나로 우리나라에서는 장대 특수교량을 중심으로 장기 모니터링 시스템이 다수 구축되어 운영되고 있으며, 장대 특수교량의 거동 모니터링에는 최근까지 유선 센서와 유선 통신 기술이 활용되어 왔으나, 최근에는 IoT 기술, 정보통신 기술, Big Data 처리기술, AI 기술, 센서기술 등 4차 산업혁명과 관련된 기술 발달로 인해, 무선센서와 저렴한 통신망을 이용하여 구조물의 거동을 연속적으로 계측하고, 계측된 결과를 활용하여 구조물의 안전성을 평가하는 무선센서 네트워크에 의한 안전관리 방안이 국내에서 적극적으로 도입되는 추세에 있음.

㉕ LoRa 스마트센서노드 Pilot Test / Test Bed 및 무선계측 검토 결과

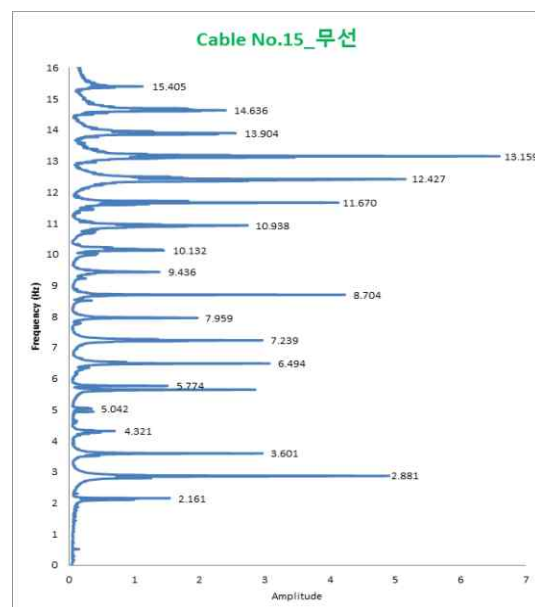
- 연구진들이 개발한 LoRa LPWAN 센서 네트워크 기반 무선 장비를 사용하여 사장교 케이블 장력 측정결과, 표 3.24 및 그림 3.84와 같이 유·무선 시스템에 의한 추정장력의 차이는 1% 내외로 개발된 노드와 게이트웨이를 이용한 LoRa 기반 무선계측시스템의 적정성이 검증되었다고 기술되어 있음.

<표 3.24> 유선과 무선 방식에 의한 장력 추정 결과 비교

| 유선(kN)   | 무선(kN)   | 오차     | 오차율(%) |
|----------|----------|--------|--------|
| 1746.262 | 1725.713 | 20.549 | 1.177  |



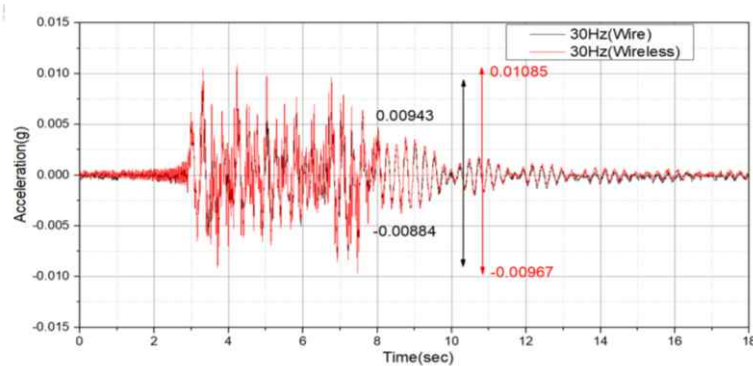
(a) 유선 3축가속도계 고유주파수



(b) 무선 3축가속도계 고유주파수

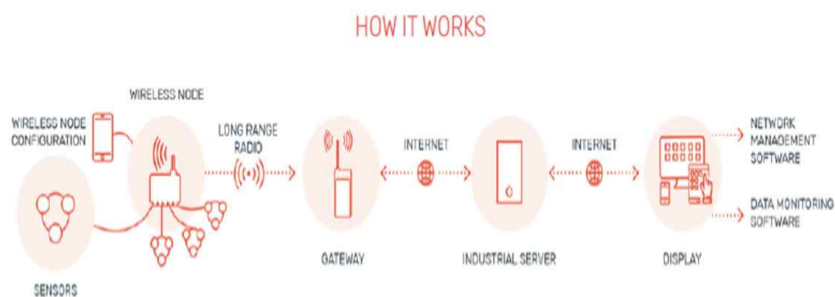
<그림 3.84> 스펙트럼 분석 결과 비교

- 씨티씨(주) 연구결과 고속철도 교량을 대상으로 유·무선 계측시스템을 사용하여 진동가속도를 측정한 결과, 그림 3.85와 같이 고속철도 선로 주변에서도 신호 방해 없이 무선시스템이 원활한 작동하는 것을 확인 함.

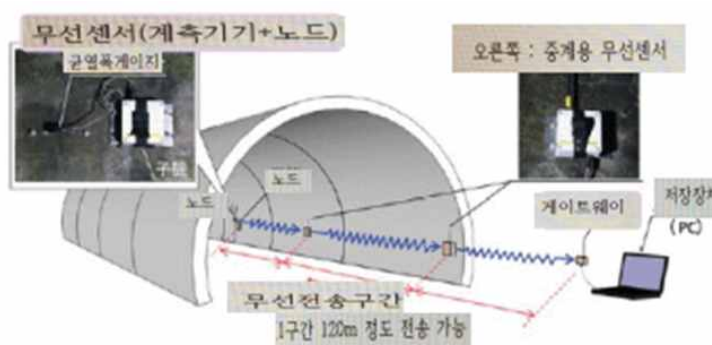


<그림 3.85> 고속철도 교량에서 측정된 유·무선 방식에 의한 가속도 이력곡선 비교

- 국외 개발된 무선 경사시스템 및 터널 무선 유지관리 시스템
- Worldsensing사에서는 그림 3.86과 같이 개발한 무선 경사시스템은 상용화되어 다양한 분야에서 활용되고 있으며 일본 철도총합연구소에서는 그림 3.87과 같이 터널 계측시스템을 개발하여 운영하고 있음.



<그림 3.86> Worldsensing사에서 개발한 무선 경사시스템 및 구성도



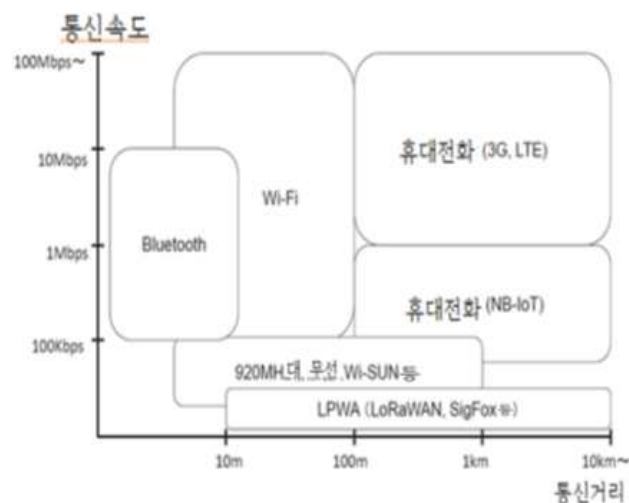
<그림 3.87> 무선센서에 의한 터널 계측 시스템 구성도(일본 철도총합연구소)

#### ㉡ 무선 계측시스템 설치 가이드(안) 정의

- 노드
- 노드란, 교량에 발생하는 응답을 측정하는 기능을 갖는 센서와, 계측데이터를 보관하고 아날로그 디지털 변환(ADC)등을 수행하는 처리기능 및 계측된 데이터를 게이트웨이로 전송하고 게이트웨이로부터 계측조건 등을 수신하는 통신기능, 전력공급기능을 갖는 센서유닛(Sensor unit)을 의미함.

- 노드에는 MEMS 센서와 같이 계측·통신·처리기능이 모두 일체화된 것과 분리된 것이 있으며, 상황에 따라 적절히 선택하여 조립·사용할 수 있음.
  - 노드는 구조물에 설치가 용이해야 하며, 별도의 전원 공급장치가 필요 없이 배터리 또는 태양열 등으로 구동되도록 하는 것이 바람직하나, 전원공급이 용이한 경우에는 배터리로 구동되도록 할 필요는 없으며, 배터리 또는 태양열로 구동시킬 경우에는 전력소모량이 많지 않는 무선통신 프로토콜을 사용하는 것이 좋음.
  - 노드는 현장에 설치되어 습도 등 주변 환경의 영향에 의해 오작동이 발생하지 않도록 전용 방수케이스를 제작하여 앵커 등에 견고히 설치하고, 게이트웨이와 통신이 용이하도록 가능한 시야가 트인 곳에 설치하는 것이 좋음.
- 게이트웨이
- 게이트웨이는, 노드와 통신하면서 노드에 저장된 데이터를 끄집어내고, 노드의 상태를 감시·제어하며, 관리자 사무실로 데이터를 전송하는 기능을 갖으며, 필요시 데이터 저장기능도 구비할 수 있음.
  - 대부분의 게이트웨이는 유선에 의한 전원공급이 가능한 곳에 설치가 가능할 것으로 판단되나, 경우에 따라서는 유선에 의한 전원공급이 용이하지 않은 현장도 있을 수 있으며, 이 경우에는 부착이 용이하고 배터리 또는 태양열 등으로 구동되도록 하는 것도 좋음.
  - 장대교의 경우 태양열 판넬을 설치하기 용이한 곳이 있을 것으로 판단되므로, 태양열을 이용하는 방법을 적용 하므로써 친환경 및 에너지 절약에 기여하는 방안도 적극 검토할 것을 권장함.
  - 현장에 설치되는 게이트웨이는 습도 등 주변 환경의 영향이 적은 곳에 전용 방수케이스 등을 별도로 제작하여 앵커 등에 의해 견고히 설치하고, 노드와 통신이 용이하도록 가능한 시야가 트인 곳에 설치하는 것이 좋음.
- 근거리 통신
- 근거리 통신망(LAN, Local Area Network 또는 PAN Personal Area Network)) 또는 IoT Network는, 현장에 설치된 여러 개의 노드와 게이트웨이 사이를 일괄적으로 제어하는 통신수단으로, 이를 이용하여 노드에서 계측·저장된 데이터는 게이트웨이로 전송됨.
  - 게이트웨이는 통신수단을 이용하여 노드의 상태를 감시하고 동작을 제어할 수 있으며, 우리나라에서 가용한 무선방식에는, LoRa, Zigbee, NB-IoT, Bluetooth, LTE, WiFi, WiSUN, WirelessHART 등이 있고, 일부 제조사에서는 별도의 Protocol을 만들어 사용하기도 함.
  - 주파수 대역별, 통신거리별 무선센서네트워크 구축시 사용될 수 있는 몇 가지 통신 규격의 개략적인 사양을 보여주며 무선계측시스템 설계를 하는 경우 그림 3.88과 표 3.25를 참조하여 현장 상황에 맞는 적절한 통신규격을 선정하여 설치하도록 해야함.
  - 무선통신을 이용하는 경우, 수백 미터 정도의 범위에서 정적거동을 측정하는 센서 정보를 읽고자 하는 경우, 100Kbps정도의 통신속도면 충분하므로, 별도의 면허가 필요 없이 전용네트워크를 만들 수 있는 LoRa와 같은 920MHz대(帶)의 무선이 적절하지만, 그러나 동화상 등 큰 용량의 데이터를 대량으로 전송하기 위해서는 수 Mbps의 고속통신이 가능한 WiFi와 휴대전화의 데이터통신 서비스를 이용해야함.
  - WiFi 의 경우 통신거리가 수십 미터에 불과하여 용도가 다소 제한적이며, 휴대전화 망은 통신료가 필요하며, 그리고 고속으로 동화상을 모니터링 하고자 하는 경우에는 더욱 큰 용량의 데이터를 통신할 수 있는 광섬유등 유선 서비스를 이용하는 것도 고려해 볼 필요가 있음.

- 따라서, 무선계측시스템을 구축하고자 하는 경우에는 계측의 목적과 현장여건 및 통신규격의 용량과 원하는 데이터 전송량을 고려한 통신규격 설계가 필요함.
- 참고로, 1축 가속도 센서 1개를 사용하고, 초당 100개의 데이터를 60초 동안 저장한 후 해당 데이터를 실시간으로 전송하고자 하는 경우 필요한 전송속도는 약 144Kbit이며, LoRa의 경우 일반적인 최대 전송가능속도는 50Kbps이고, Zigbee의 경우 최대 250Kbps 이므로 Zigbee에 의해서는 가속도 센서 1개의 계측값을 실시간으로 전송하는 것이 가능하나 LoRa에 의해서는 불가능함을 알 수 있음.
- 더욱이, 장대 교량의 모니터링 시스템에 사용되는 센서는 일반적으로 2개 이상이므로 Zigbee도 실시간 전송에는 적합하지 않게 되고 이와 같은 경우에 대한 방안으로는, 첫째 WiFi, Bluetooth 등 전송 속도가 매우 빠른 통신규격을 사용하거나, 둘째는 계측데이터를 실시간이 아닌 일정 시간동안 노드 또는 게이트웨이에 저장한 후 데이터를 묶어서 전송하는 방법이 있다. 첫 번째 방법의 경우 통신거리 문제, 통신 품질문제(주변에 동일 통신 규격을 사용하는 경우 통신 점유율이 저하되어 신호 끊김 현상이 발생할 수 있음)가 발생할 가능성이 높고, 두 번째 방법의 경우 실시간 계측이 불가능하다는 단점이 있음.
- 하지만 교량의 경우 반드시 실시간 계측이 필요한 경우는 많지 않을 것으로 사료되므로 대부분의 경우 두 번째 방법이 적절함.
- 따라서 LoRa와 같이 통신속도에 제한이 있는 통신망을 사용하여 구조물의 정·동적 거동을 모니터링 하고자 하는 경우에는, 두 번째 방법이 적절한 대안이 될 수 있고, 이 방법을 사용하여 데이터를 전송하는 경우에는 1회 전송량, 전송에 소요되는 시간, 전송빈도, 주변환경(통신 점유율), 배터리 소모량 등을 감안하여 원하는 목적에 맞는 통신방법을 설계하여야 할 것이다. 또한 데이터 전송량 계산시에는 순수 계측데이터 뿐 아니라 암호화 여부, 주석의 크기 등도 함께 고려해야함.
- 무선계측시스템에 의해 구조물의 거동을 모니터링 하고자 하는 경우 장대교에는 다수의 노드가 설치되어야 하는 경우가 대부분이며, 이와 같이 여러 개의 노드가 설치되는 경우 이들로부터 직접 계측 데이터를 게이트웨이에 전송되는 방식을 1 : N 통신이라고 부름.
- 이와 같은 통신방식을 채택하는 경우 장애물 등에 의한 전파도달거리의 제한으로 인해 사용하는 통신규격에 따라 원활한 데이터 전송이 불가능할 수 있음.

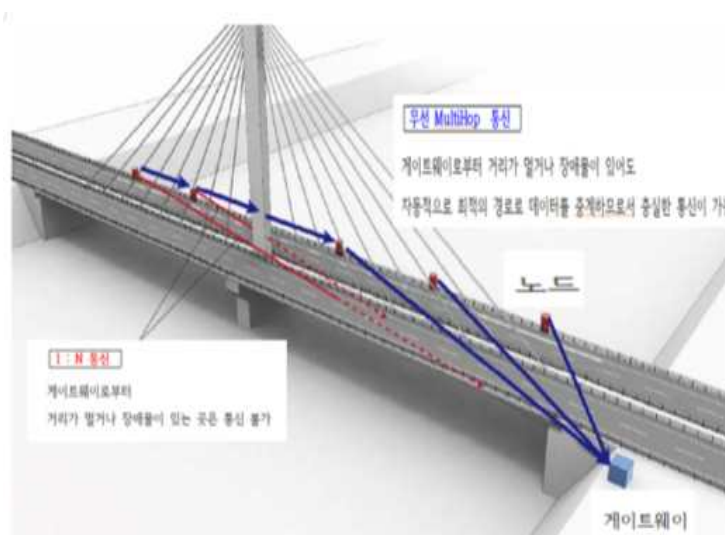


<그림 3.88> 통신규격별 데이터 전송율과 전송거리

<표 3.25> 대표적인 주파수 대역별 통신규격 비교

| Hz          | 920MHz대                                                        | 2.45GHz대                                                       |
|-------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 규격명         | LoRa, WiSUN, NB-IoT 등                                          | Zigbee, WiFi, Bluetooth                                        |
| 통신가능거리      | 10km 내외(LoRa)<br>1km 내외(WiSUN)<br>15km 내외(NB-IoT)              | 100m 내외                                                        |
| 최대통신속도      | 300bps~50Kbps(LoRa)<br>400Kbps 내외(WiSUN)<br>200Kbps 내외(NB-IoT) | 0.25Mbps 내외(Zigbee)<br>22Mbps 내외(WiFi)<br>24Mbps 내외(Bluetooth) |
| 최대송신전력      | 20mW                                                           | 10mW                                                           |
| MultiHop 기능 | 가능                                                             | 가능                                                             |
| 통신장애        | 적음                                                             | 많음                                                             |

- 이와 같은 경우에는 무선 게이트웨이를 여러 대 설치하고 그 사이를 별도의 유선 네트워크로 연결하여야 통신이 가능해지는데, 이를 위해서는 별도의 선로부설공사가 필요해져 무선의 장점이 훼손됨.
- 이러한 문제를 해결하기 위해서는 그림 3.89와 같은 MultiHop 방식을 채택할 필요가 있으며 MultiHop 방식이란, 그림 8과 같이, 무선 게이트웨이로부터 전파가 도달되지 않는 장소에 무선 노드가 설치되어 있는 경우, 무선 노드가 다른 무선노드로부터 데이터를 중계하여 모든 노드로 부터의 데이터가 게이트웨이로 전송되는 방식을 의미함.
- 교량 등 대규모 구조물의 경우 모니터링을 위한 센서 설치 장소가 항상 전파 도달성이 좋지 않을 뿐 아니라, 센서를 광범위한 범위에 다수 설치해야 하는 경우 데이터를 무선으로 중계하기 위해서는 MultiHop 방식에 대해서도 충분한 검토가 필요함.



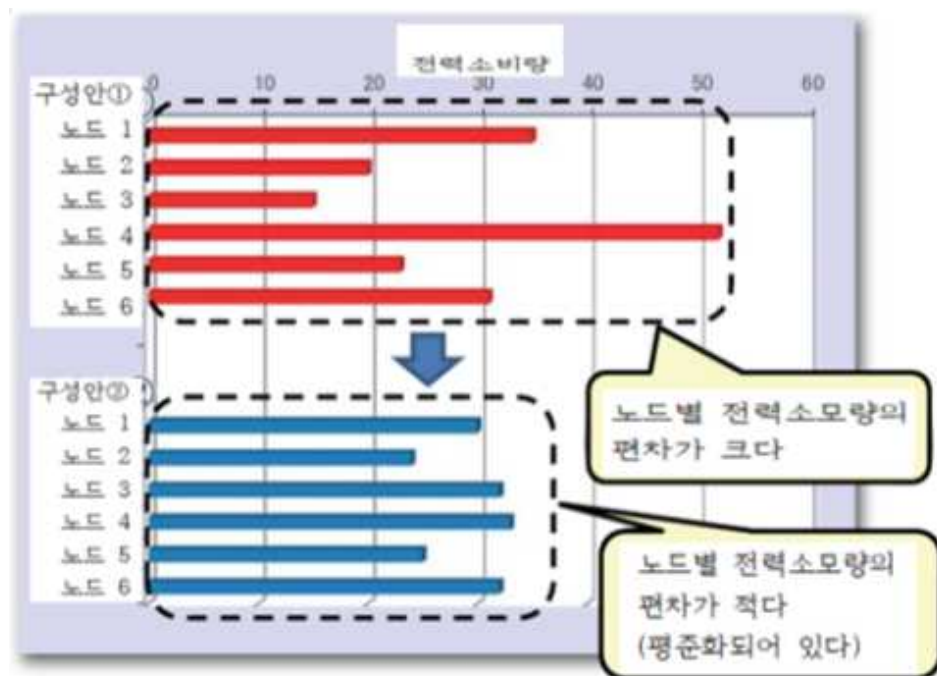
<그림 3.89> MultiHop 방식에 의한 통신 방법

- 광역 통신

- 광역 통신망 WAN은, 게이트웨이와 사무실 컴퓨터사이의 통신수단이며 이 통신망을 이용하여 게이트웨이에 저장된 계측 데이터를 사무실 컴퓨터로 전송되고 사무실 컴퓨터로부터 게이트웨이의 동작을 지시할 수 있음.
- 광역통신망은, 교량구조와 주변의 통신환경을 고려할 때 통신의 신뢰성 확보차원에서 유선통신 방식이 좋지만, 유선네트워크가 존재하지 않거나 부설이 곤란한 경우 LTE, 4G 등과 같은 무선 방식을 사용할 수 있다. 유선방식이든 무선방식이든 어떠한 경우에도, 사무실컴퓨터와 게이트웨이가 광역통신망을 통해 통신이 가능하기 위해서는 사전에 설정작업이 필요하며 구체적으로는, 사무실컴퓨터에는 게이트웨이를 식별할 수 있는 정보를 게이트웨이에서는 사무실컴퓨터의 주소 정보 등을 등록해 두어야 상호 통신이 가능해 짐.

- 전력공급방식

- 교량의 경우 주변에 유선 전력공급이 불가능한 경우가 많으나 모니터링 시스템을 위해 유선 전력공급 방식을 채택하는 경우 무선시스템의 장점이 훼손되므로 가능한 전력공급도 무선방식을 채택하는 것이 좋음.
- 이를 위해서는 무선통신규격 선정시 전력소모량이 적은 규격을 선정하도록 하고, 시스템 운영에 필요한 소요 전력량을 면밀히 검토하여 배터리 방식을 채용하거나 태양열 패널 등을 설치하여 시스템의 효율성을 도모하여야 할 것임.
- 최근에는 5년 동안 교체가 불필요한 배터리도 가용하다는 것은 앞에서 언급하였으며 한편, 구조물에 여러 대의 노드가 설치되어 있고, 모든 노드가 배터리에 의해 구동되는 경우, 네트워크 전체의 배터리 수명(배터리 교환작업이 필요할 때 까지 시간)을 가능한 연장하는 것이 시스템 효율성 측면에서 매우 중요한 사항이 됨.
- 네트워크 전체의 배터리 수명을 연장하기 위해서는 그림 3.90의 구성안과 같이 각 노드의 소비전력을 가급적 평준화할 필요가 있으므로, 시스템 설계 시 이러한 사항을 반드시 고려하여야 함.



<그림 3.90> 노드별 전력소모량에 따른 전체 배터리 수명 비교

- 게이트웨이 수량에 따른 네트워크 전체의 배터리 수명을 비교한 사례를 보여주며 위 그림에서 알 수 있듯이 게이트웨이 수를 늘리면 수명이 증가하지만, 게이트웨이 숫자 증가로 인해 시스템 도입 비용(초기 비용)이 증가하므로, 도입시 이러한 사항에 대해서도 충분한 검토가 필요함을 알 수 있음.

- 모니터링 S/W

- 모니터링 S/W(또는 그림 6의 어플리케이션)의 주기능은, 노드와 게이트웨이의 상태관리, 동작제어, 통신상태 확인, 데이터 분석 및 저장을 하고, 계측 결과를 디스플레이하고 평가하는 기능도 있어야 함.
- 모니터링 S/W는, 광역통신망을 통해 게이트웨이를 직접적으로 통제·관리하고, 그리고 노드는 게이트웨이를 통해 간접적으로 그들의 상태와 동작을 관리하고 제어할 수 있어야 할 뿐 아니라, 이를 통해 계측조건의 변경등도 원격에서 제어가 가능하도록 구축하여 시스템 확인을 위한 현장방문 횟수를 가능한 줄일 수 있도록 구축하는 것이 좋음.
- 모니터링 화면에는, 구조물의 안전성 평가를 위한 관리기준과 계측치의 시간 당 변화 패턴 뿐 아니라, 시스템의 동작상태도 확인이 가능하도록, 모든 노드의 통신상태, 전파강도, 배터리 소모량 등도 함께 디스플레이 되어야 함.
- 앞서서도 언급한 바와 같이, 무선센서네트워크 시스템에서는, 측정된 데이터를 어떻게 효율적으로 전송하는가 하는 것이 중요한 과제가 되기 때문에 일반적으로는 계측된 모든 데이터를 모두 실시간으로 전송할 필요는 없음. (예를 들면, 센서에서 계측된 Raw Data를 노드와 게이트웨이에 부속되어 있는 로컬 저장장치에 기록하고 이 데이터를 이용하여 계산된 통계정보(예를들면 평균, 분산, 횟수 등)와 감시 대상 구조물의 상태를 평가한 결과만을 데이터 관리 서버로 전송하여 사용하는 방법도 있고 어떠한 관리한계치를 초과하는 데이터를 선별하여 서버에 전송하여 사용할 수 도 있음)
- 이와 같이 센서 노드에 부속되어 있는 저장장치를 적절히 활용하므로서, 무리한 통신을 피하게 되면 배터리 수명을 연장하는 효과도 있으므로 S/W 개발시 적절히 고려하여야 할 것임.

㉔ 무선 계측시스템 유지관리 가이드(안) 제시

- 무선계측시스템은, 시스템의 장기운동을 전제로 하므로, 배터리 등 소모품을 제외하고 모니터링 기간 중에는 가능한 유지보수가 불필요하도록 시스템을 구축해야함.
- 모니터링 시스템의 오작동으로 인한 계측자료의 오류를 제거하고 시스템 운영기간 동안 데이터의 정확성을 확보하기 위해, 사용자는 시스템 설치회사의 도움을 받아 적절히 시스템을 유지관리할 필요가 있기 때문에 모니터링 시스템이용자는 시스템 설치회사가 추천하는 방법을 준수하여 유지보수가 필요함..
- 배터리 방식으로 전력공급을 하는 경우를 대비하여 계측데이터 손실 없이 배터리를 교환할 수 있도록 교환방법, 교환주기 등을 미리 확인해 두어야 한다. 그리고 태양열과 같은 자연환경을 이용하는 전력공급방식을 사용하는 경우에는 태양열 집열판 등 전력 공급 설비의 유지관리에 대해서도 설치자의 협조를 받아 충분히 검토해 두어야 함.
- 계측시스템의 가장 기본은 정확한 계측자료의 획득이라고 할 수 있다. 정확한 계측자료가 획득되는지 확인하기 위해서는, 먼저 계측 시스템 설치 완료 후 시스템이 적절히 가동되는지 확인하여야 한다. 이를 위해, 센서가 부착된 모든 위치에서의 계측결과를 구조해석 또는 다른 유선방식 등에 의한 계측결과와 비교하는 것이 좋으며 시스템 운영 중에도 일년에 일회 이상 계측결과를 검증하는 것이 좋음.

- 시스템 운영 시 주변 환경변화 등으로 인해 원활한 전력공급이 어려운 경우가 발생할 수 있어 상황을 즉시 확인하고 신속한 대책을 수립하기 위해서는 관리자 모니터에는 모든 노드와 게이트웨이의 전력공급 상태(배터리 방식의 경우 잔여 배터리량, 태양열등 이용하는 경우 잔여 전력량)가 모니터 되어야 함.
- 전력 공급장치의 문제로 계측 장애가 일어나지 않도록 미리 관리자에게 알람을 통보하는 기능을 갖추는 것이 좋으며 배터리 방식을 사용하는 경우 배터리 수명을 가능한 연장할 수 있도록, 전력 소모량의 적은 통신주파수를 사용하고 노드별 전력소모량이 평준화되도록 설계하여야 함.
- 게이트웨이 수량하는 조정하는 방안에도 대해서도 설계 시 충분히 검토하여야 함.
- 설계시에는 각 노드별 전력소모량, 게이트웨이 전력소모량을 계산하여 배터리 교체 시기를 미리 파악해 두는 것이 좋으나 유선 전력공급 방식을 사용하는 경우 정전에 대비한 무정전 전원공급장치(UPS, Uninterruptible Power Supply)도 비치해 두어야 함.
- 관리자 모니터에는 모든 노드와 게이트웨이의 통신상태 및 게이트웨이와 관리자 컴퓨터 사이의 통신상태가 반드시 모니터 되도록 하고, 통신상태가 원활하지 않다고 판단되는 경우 즉시 관리자에게 알람을 통보하는 기능을 갖추는 것이 좋음.
- 시스템 설계 시 통신 장애가 발생할 경우를 대비하여 적절한 대책이 수립되어 있어야 한다. 교량 내부에 노드를 설치하는 경우 모든 노드와 게이트웨이 사이의 통신이 원활하지 않을 수 있으므로, 이러한 경우를 대비하여 Multi-Hop 방식을 사용하는 통신방법을 적용하는 것이 좋음.
- 모니터링 시스템의 가장 큰 문제 중 하나는 오작동으로 인한 잘못된 데이터 검출이며 검출된 데이터가 구조물의 거동과 손상에 의한 것이 아니고, 사람의 접촉, 전기노이즈 및 센서의 고장 등에 의해 잘못된 계측이 이루어지는 경우도 있다. 이러한 오검출이 있으면 모니터링의 신뢰성에 치명적인 영향을 줄 뿐 아니라, 실제 구조물에 이상이 있는 경우에 적절한 조치를 취하지 못할 우려됨.
- 이러한 오류를 줄이는 방법 중 하나는 복수의 센서를 사용하는 것이지만 시스템 구축에 소요되는 비용 등을 감안하여 결정하여야 하며, 다른 대안으로는 시스템에 자가 진단 기능을 추가하여 수시(주 1회 정도)로 시스템의 자가 진단을 수행하고 고장이라고 판단되는 경우 즉시 관리자에 통보하여 필요한 조치를 취할 수 있도록 하여야 함.
- 자가진단 시스템은 손상이 발생한 위치, 시간 등을 정확히 기록할 수 있어야 하지만 계측자료에 이상 징후가 보이는 경우 즉시 관리자에게 통보하고 센싱 빈도와 전송 빈도를 높임으로서 이상상태 확인이 가능하도록 자율적이 제어 기능도 필요함.
- 계측시스템은 수년 동안의 장기계측을 위해 설치하는 경우가 대부분이므로, 시스템 설치가 완료된 후에는, 센서, 노드, 게이트웨이, 통신, 전력공급장치 등이 모두 원활히 작동하는지 확인하고, 그 결과를 설치 완료보고서로 작성해 두어야 함.
- 설치완료 보고서에는 유사프로젝트 수행 시 시행착오 등을 줄이기 위해 시스템 계획 및 설계 단계에서의 검토사항 뿐 아니라, 시스템 설계도, 전력공급장치 및 통신방법을 포함한 설치와 관련된 세부내용 뿐 아니라, 운영 및 유지관리 등 시스템 전반에 관한 모든 사항을 세밀하게 작성하여 기록해 두어야 하며 설치완료 보고서에 수록되어야 하는 주요 목차 및 내용은 표 3.26과 같음.

- 1) 유지관리 계측시스템 준공날짜가 표기된 제출문
- 2) 시스템 구성도
  - 가. 노드, 게이트웨이 및 시스템 배치도
  - 나. 전원 공급 방식에 대한 상세도
  - 다. 통신 방식
  - 라. 게이트 웨이 및 사무실 컴퓨터 어드레스 정보
  - 마. 시스템 구성도
- 3) 모든 센서 및 장비들에 대한 상세한 사양
  - 가. 기기명
  - 나. 설치 위치
  - 다. 기기 제조사 카탈로그, 사양서 및 매뉴얼
  - 라. 기기별 시험성적서 및 물리량 환산 교정계수
  - 마. 로거 모듈 구성 및 채널 구성
- 4) 통신 규격
- 5) 계측데이터
  - 가. 계측 데이터 흐름도
  - 나. 계측항목 측정빈도, 대표 값, 추출빈도
  - 다. 데이터베이스 구성 현황
  - 라. 데이터로거 제어프로그램(제조사 제공 프로그램) 현황 및 초기 설정 자료
  - 마. 데이터 획득 응용프로그램 매뉴얼
  - 바. 초기 점검 보고서(계측데이터 신뢰성 검증결과)
  - 사. 계측 데이터베이스 또는 초기치 변경 이력
  - 아. 초기 운영 보고서(계측데이터 이력)
- 6) 시스템 운영 매뉴얼
- 7) 시스템 유지관리 매뉴얼
- 8) 노드, 게이트웨이 등 모든 장비 사진대지

- 박스형 교량의 경우, 박스 내부에 시스템을 설치하는 경우 유지관리는 용이할 수 있으나 통신 문제가 발생할 수 있으므로, 충분한 검토를 하고 필요시 분리형 안테나 등을 설치하는 방안에도 검토해야함.
- 방수, 방습 등을 위해 별도의 밀폐형 케이스를 제작하여 사용해야함.
- 시스템에 사용되는 모든 무선 장비의 내구성, 기대수명, 고장빈도 등에 대한 사례 조사를 통해(이 부분은 시스템 설계시 포함하는 것을 권장함) 유지관리에 소요되는 비용과 방법 등을 충분히 검토하고, 필요시 예비 장비를 구비해 두도록 함.

- 
- 시간동기화가 필요한 계측항목에 대해서는 시간동기화에 대한 허용 오차범위( $\pm 500\text{micro second}$  이내)를 만족하는지 계측 전 확인해야함.
  - 계측데이터의 안정적 관리를 위하여 백업 기능을 갖도록 구성하여야 하고, 해킹방지용 보안시스템도 설치 되어야 함.
  - 계측시스템 서버에는 바이러스 또는 스파이웨어 등을 막기 위해 백신이 설치되어야함.
  - 외부 보안의 필요성이 높은 경우에는 네트워크 상으로 가상사설망(VPN)을 설치하고, 내부적인 보안 시스템이 필요할 경우 방화벽(FireWall)을 구성하여 운영해야함.
  - 계측시스템의 효율적인 운영과 관리를 위해 전담인력을 배치하여 운영해야함.
  - 계측시스템의 하자담보책임기간은 한국시설안전공단에서 작성한 ‘특수교 계측시스템 설치 및 운영 요령(안)’을 참조하여 설치자와 협의하여 결정해야함.

## 제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

### 1. 목표 달성도

#### 가. 질적성과 달성도

##### (1) 질적성과 달성도

| 구분             | 핵심연구성과                                     | 단위성과물                                                | 질적성과<br>지표                 | 목표치                                        | 측정방법                             | 달성치                                   | 해당기관              |
|----------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| 주관<br>연구<br>기관 | 통합모듈형<br>LoRa LPWAN<br>교량 무선계측<br>센서 보드 개발 | 통합모듈<br>교량계측<br>센서 보드                                | 가속도계<br>센서<br>계측성능         | 국외기준 :<br>3axis<br>±2/±6g                  | 실내실험,<br>사전 Pilot<br>test<br>보고서 | 1건 제시<br>(100%)                       | (주)동일<br>기술<br>공사 |
|                |                                            |                                                      | 온도계<br>계측성능                | 국외계측범<br>위:<br>-40~120℃<br>정밀도 :<br>0.01℃  | 실내실험,<br>사전 Pilot<br>test<br>보고서 |                                       |                   |
|                |                                            |                                                      | 습도계<br>계측성능                | 국외계측범<br>위:<br>0~100%RH<br>정밀도:<br>0.05%RH | 실내실험,<br>사전 Pilot<br>test<br>보고서 |                                       |                   |
|                |                                            | 통합모듈<br>Arduino 기반<br>DAQ                            | 기존 상용<br>계측센서<br>인터페이스     | 국외<br>RS-232/<br>RS-485<br>Interface구현     | 사전 Pilot<br>test                 | 100%                                  |                   |
|                |                                            | 통합모듈<br>LoRa<br>Class A/C<br>LPWAN<br>Sensor<br>Node | 신호도달<br>거리                 | 1~10km<br>이상                               | 실내실험<br>사전 Pilot<br>test         | 100%                                  |                   |
|                |                                            |                                                      | Data Rate                  | 국외 :<br>250bps ~<br>5.4kbps                | 실내실험<br>사전 Pilot<br>test         |                                       |                   |
|                |                                            | 건전성평가                                                | 계측을 통한<br>안전성<br>평가방안      | 1건 이상                                      | 분석<br>보고서                        | 100%                                  |                   |
|                | 교량<br>LoRa<br>LPWAN<br>무선계측<br>플랫폼 구축      | Scalability<br>확보                                    | AP 당 연결<br>계측 단말수          | 100<br>계측단말<br>이상                          | 연동여부<br>검증                       | S/W<br>2건 제시<br>(100%)                |                   |
|                |                                            | 데이터 보안/<br>암호화                                       | SSL/<br>AES                | SSL/AES<br>표준 구현                           | 연동여부<br>검증                       |                                       |                   |
|                |                                            | 센서네트<br>워크, OS/<br>미들웨어                              | LoRa<br>Alliance<br>표준     | LoRa<br>Alliance<br>표준 구현                  | 연동여부<br>검증                       |                                       |                   |
|                | 대용량 계측<br>데이터<br>Big Data<br>시스템개발         | 하둡(Hadoop)<br>기반 Big<br>Data 분석<br>시스템               | HDFS,Map<br>Reduce<br>구현여부 | 분산 처리<br>구현                                | DB수집<br>및 검증                     | 100%<br>(influx<br>DB기반<br>시스템<br>구축) |                   |
|                |                                            | 통합 교량<br>관리<br>시스템(BMS)                              | 연결 시설물<br>데이터 통합<br>연동 여부  | 이종 센서<br>데이터 통합<br>처리 여부                   | DB수집<br>및<br>검증                  | 100%<br>(influx<br>DB기반<br>시스템<br>구축) |                   |

| 구분             | 핵심연구성과                                           | 단위성과물                  | 질적성과<br>지표                   | 목표치 | 측정방법      | 달성치            | 해당기관         |
|----------------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------------|-----|-----------|----------------|--------------|
| 공동<br>연구<br>기관 | 노후교량<br>무선계측<br>유지관리<br>시스템 표준화<br>및 지침 개발<br>연구 | 계측기기<br>규격 표준화<br>방안   | 무선계측기<br>기 표준화<br>매뉴얼        | 1건  | 보고서<br>작성 | 1건제시<br>(100%) | 한국시설안<br>전공단 |
|                |                                                  | 계측시스템<br>관리기준          | 무선계측시<br>스템<br>관리기준<br>설정 방안 | 1건  | 보고서<br>작성 | 1건제시<br>(100%) |              |
|                |                                                  | 시스템 시공<br>및 유지관리<br>지침 | 시공 및<br>유지관리지<br>침           | 1건  | 보고서<br>작성 | 1건제시<br>(100%) |              |

## (2) 질적성과 달성 주요내용

### ① 주관연구기관 질적성과 달성 주요내용

| 핵심연구<br>성과                                          | 단위<br>성과물                    | 질적성과 달성 주요내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 통합모듈형<br>LoRa<br>LPWAN<br>교량<br>무선계측<br>센서 보드<br>개발 | 통합모듈<br>교량계측<br>센서 보드        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 교량 케이블 장력 분석, 보강거더 고유진동수 분석 및 경사 분석 등에 활용할 수 있는 MEMS 3축 가속도계와, 온도계, 습도계 등을 포함하는 교량계측 센서보드를 개발하였음.</li> <li>- 실내실험과 여수 돌산대교, 전주천교, 영광대교 등의 Pilot 및 Test Bed를 통해서 Data의 정확성을 확인함.</li> <li>- 본 연구를 통해 개발된 LoRa 스마트센서노드와 연동할 경우, 기존 모니터링 및 재하시험 등에 사용되는 고가의 키슬러 등의 외산 센서와 National Instrument 등의 외산 데이터로거 장비를 저렴하고 효율적인 장비로 대체 가능함.</li> </ul> |
|                                                     | 통합모듈<br>Arduino<br>기반<br>DAQ | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1차년도 상용보드인 RaspberryPi 기반으로 센서데이터를 처리하고 LoRa 통신이 가능한 DAQ를 구현하였으며, 3차년도에서는 상용화를 위해, rs-232, rs-485의 디지털 센서인터페이스 2개와 전압 타입, 전류 타입, 저항 타입의 입력을 처리할 수 있는 인터페이스 4개를 갖춘 DAQ를 개발함.</li> <li>- 개발된 DAQ를 통해서 개발된 통합센서보드외에 기존 교량 모니터링에 사용되던 신축변위계, 온도계, 변형률계, 풍향풍속계들의 입력자료를 처리하여 통합된 센서네트워크 구축 가능하도록 개발함.</li> </ul>                                  |

|                                       |                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       | 통합모듈<br>LoRa<br>Class<br>A/C<br>LPWAN<br>Sensor<br>Node | <ul style="list-style-type: none"> <li>- LoRa 센서노드는 통합센서보드 및 DAQ를 통해 수집된 데이터들에 대한 후처리 과정과 LoRa LPWAN 통신을 담당하도록 구현함.</li> <li>- 1차년도는 상용 Arduino보드와 LoRa shield를 통해 Prototype 구현 및 Lab Test를 통하여, 센서네트워크에 사용될 수 있는 가능성 판단여부를 연구 수행함.</li> <li>- 2차년도는 CPU, Memory, 저장장치 및 On board LoRa 모듈을 포함하는 센서노드를 개발하였으며, 또한 개발된 센서노드에서 가속도 데이터에 대한 FFT 등을 처리하는 분산처리 시스템을 개발함.</li> <li>- 3차년도는 2차년도 개발된 센서노드를 상용화 가능한 수준으로 고도화 시켰으며, 운영체제 면에서 Linux등의 범용 OS가 아닌 RTOS(Real Time OS)를 채용하여 저전력을 특징으로 하는 LoRa 센서노드에 최적화 구현하였음.</li> <li>- 영광대교의 장기 테스트베드를 통해서 성능 검증함.</li> </ul> |
|                                       | 건전성<br>평가                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 본 연구를 통해 개발된 시스템을 적용하여 여수 돌산대교, 전주천교의 케이블 장력을 평가하였으며, 특히 영광대교의 경우 2019년 10월부터 장기 테스트베드 설치 운영하여 건전성 평가를 수행함.</li> <li>- 케이블 장력의 경우 기존 유선 센서와 데이터로거를 통한 계측값 대비 1% 내외의 오차 수준으로 Data의 신뢰성을 확보하였음.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 교량<br>LoRa<br>LPWAN<br>무선계측<br>플랫폼 구축 | Scalability<br>확보                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 영광대교 테스트베드를 통해서, 5개의 센서노드 및 7개의 센서로 구성된 센서네트워크를 구축하였음.</li> <li>- 10초 주기의 더비(dummy) 신호와 1분 주기의 데이터 신호 전송을 했을 때 90 % 이상의 1차 시도 성공률을 보이고 있으며, 실제 교량계측시스템의 전송 주기(정적데이터의 경우 10분 주기)를 고려했을 때 1개의 AP 당 100 단말 이상의 수용 가능하도록 구현함.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                       | 데이터<br>보안/<br>암호화                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- LoRa 단말에서 LoRa 네트워크 서버로 전송되는 데이터는 AES-128 로 암호화하여 전달되고, 서버에서 복호화 하였음.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                       | 센서네트<br>워크, OS/<br>미들웨어                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1차년도 개념구현에서는 라즈베리파이 보드에서 센서노드 및 DAQ 기능을 구현하여 작동</li> <li>- 2차년도에서는 범용 OS 인 Linux에서 DAQ 및 데이터 분산 처리, LoRa ClassA/C 통한 통신 구현함.</li> <li>- 3차년도에서는 RTOS 적용으로 개발된 센서노드의 동작을 최적화를 구현함.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

|                           |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 대용량 계측 데이터 Big Data 시스템개발 | Influx기반 Big Data 분석 시스템 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 당초 하둡(Hadoop) 기반의 Big Data 시스템을 계획하였으나, 하둡 기반의 시스템이 애초 검색엔진을 위해 개발된 시스템이기 때문에, 시계열(Time Series) 특성을 갖고 있는 계측 데이터에 적용은 비효율적으로 파악하였음.</li> <li>- 1,2차년도 연구에서는 관계형 데이터베이스 시스템 (RDBMS)인 MySQL 기반으로 데이터베이스 시스템을 구축하였으며, 3차년도 연구에서는 오픈소스 기반으로 Big Data 처리가 가능하며 확장성, 고가용성, 빠른 쓰기 및 읽기가 가능한 시계열 데이터베이스 시스템인 InfluxDB를 데이터베이스 시스템을 구축 함.</li> </ul> |
|                           | 통합 교량 관리 시스템(BMS)        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 구축된 센서네트워크의 모니터링을 위해 MySQL / Web 기반의 교량 관리 시스템 구축하였음.</li> <li>- 센서네트워크와 InfluxDB 기반의 Big Data 시스템의 실시간 계측 데이터 모니터링을 위해 Grafana를 이용한 대쉬보드(Dash board)를 구현함.</li> </ul>                                                                                                                                                                      |

## ② 공동연구기관 질적성과 달성 주요내용

| 핵심연구 성과                           | 단위 성과물           | 질적성과 달성 주요내용                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 노후교량 무선계측 유지관리 시스템 표준화 및 지침 개발 연구 | 계측기기 규격 표준화 방안   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 교량에 대한 유지관리를 목적으로 계측되고 있는 유선 계측센서를 바탕으로 무선 계측기기로 도입하기 위한 센서의 SPEC을 결정하여 계측기기 규격 표준화 방안에 대한 가이드(안)을 도출하였음.</li> </ul>                                                                                  |
|                                   | 계측시스템 관리기준       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 본 연구과제를 통하여 개발된 무선계측시스템에 대해서 관리자의 해당 시설물의 유지관리 기준 (목적, 현장여건 등)을 설정하여 계측빈도, 계측방법 등에 대한 방안을 무선계측시스템 관리기준 가이드(안)을 도출하였음.</li> </ul>                                                                         |
|                                   | 시스템 시공 및 유지관리 지침 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 교량 시설물에 대한 실시간 감시를 통하여 사전 구조물 손상을 방지하고 이러한 감시에 대한 기존 대비 인력과 비용을 줄이기 위한 무선계측시스템을 도입하고자 하는 목적으로 이러한 무선계측시스템에 대한 설계 및 설치에 대한 세부적인 사항을 제시하고 이러한 표준화된 운영을 제공하기 위해 무선계측시스템 시공 및 유지관리 가이드(안)을 도출하였음.</li> </ul> |

## 나. 양적성과 달성도

### (1) 차년별 양적성과 달성도

| 구분       |                        |                | 1차년도 |     | 2차년도 |     | 3차년도 |             | 총괄 |                  |
|----------|------------------------|----------------|------|-----|------|-----|------|-------------|----|------------------|
|          |                        |                | 목표   | 달성치 | 목표   | 달성치 | 목표   | 달성치         | 목표 | 달성치              |
| 전체<br>총괄 | 국외<br>논문<br>게재         | SCI            |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 비SCI           |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 계              |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          | 국내<br>논문<br>게재         | SCI            |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 비SCI           | 1    | 0   | 2    | 2   | 2    | 3           | 5  | 5                |
|          |                        | 계              | 1    | 0   | 2    | 2   | 2    | 3           | 5  | 5                |
|          | 특허<br>출원               | 국내             | 1    | 1   | 1    | 1   | 0    | 1           | 2  | 3 (초과달성)         |
|          |                        | 국외             |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 계              | 1    | 1   | 1    | 1   | 0    | 1           | 2  | 3 (초과달성)         |
|          | 특허<br>등록               | 국내             |      |     | 1    | 1   | 1    | 2           | 2  | 3 (1건 우선<br>심사중) |
|          |                        | 국외             |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 계              |      |     | 1    | 1   | 1    | 2           | 2  | 3 (1건 우선<br>심사중) |
|          | 인력<br>양성               | 석사             |      |     |      |     | 0    | 2           | 0  | 2 (초과달성)         |
|          |                        | 박사             |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 계              |      |     |      |     | 0    | 2           | 0  | 2 (초과달성)         |
|          | 기술<br>이전               | 계약 건수          |      |     |      |     | 0    | 1           | 0  | 1 (예정)           |
|          |                        | 계약액            |      |     |      |     | 0    | 1           | 0  | 1 (예정)           |
|          |                        | 징수액            |      |     |      |     | 0    | 4,680<br>천원 | 0  | 4,680천원<br>(예정)  |
|          | 국제<br>표준화              | 기고서 제출         |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 기고서 채택         |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 표준안 채택         |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          | 국내<br>표준화              | 기고서 제출         |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 기고서 채택         |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 표준안 채택         |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          | 등록·<br>기타<br>대상성<br>과물 | 보고서 원문         |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 연구시설·장비        |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 기술요약정보         |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 소프트웨어          |      |     | 2    | 2   | 2    | 2           | 4  | 4                |
|          | 기타                     | 화학물            |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 시제품            | 3    | 3   | 1    | 2   | 1    | 3           | 2  | 8(초과달성)          |
|          |                        | 성과 홍보          |      |     | 0    | 1   | 0    | 2           | 0  | 3(초과달성)          |
|          |                        | 설계도면           |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 시험시공 및<br>현장적용 |      |     |      |     | 0    | 1           | 0  | 1(초과달성)          |
|          |                        | 일자리 창출         |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 학술발표           |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 장치개발           |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 정책제안           |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 업무절차서          |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 신기술            |      |     |      |     |      |             |    |                  |
|          |                        | 사업화(판매)        |      |     |      |     |      |             |    |                  |

---

## 2. 관련 분야 기여도

### 가. 기술적인 기여도

#### (1) RTOS기반 LoRa LPWAN 유지관리시스템 요소기술력 확보

- ① 저전력 무선통신이 가능한 RTOS기반으로 독자적인 PCB보드에 대한 H/W 및 S/W 설계/제작 자체기술력 확보.
- ② 저용량 Data 전송을 위한 교량 거더 및 케이블의 결과값의 송수신으로 기존 Raw Data 수집 후 후처리 가공 분석에 따른 인력 소요 최소화 가능.
- ③ 응력계, LVDT, 풍향 풍속계, 수위계 등 기존 현장에서 사용되는 센서와 인터페이스는 개발된 하드웨어의 수정하지 않고 스마트센서 노드 및 DAQ의 프로그램 조정으로 가능하여 수요처의 요구사항에 유연한 대응이 가능하여 다양한 적용분야 활용기술력 확보.

#### (2) LoRa 기반 Big Data 교량 유지관리 시스템 플랫폼에 대한 원천기술력 확보

- ① Influx DB, Grafana 등을 활용하여 LoRa 기반 Big Data 교량 유지관리 시스템 플랫폼 구현을 위한 원천기술력 확보.
- ② 계측센서로부터 수신된 시계열 DB에 대한 Big Data 시스템 구현으로 향후 교량의 건전성 및 안전성을 제시할 수 있는 기초자료 활용 가능.

### 나. 경제적 및 산업적인 기여도

#### (1) IoT 기반 무선계측 유지관리 시스템 적용에 따른 설치/운용 비용절감

- ① 기존 유선계측 유지관리 시스템 대비 저비용 설치/운용으로 상시계측 시설물 확대 적용 가능 (기존 유선계측설치 대비 최대 40%이상 절감 가능)
- ② 대형 통신사에서 제공하는 상용망 IOT(LTE-M, NB-IoT)기반 무선계측 유지관리 시스템 대비 수요자가 통신사로 지불하여야 하는 Data 과금비용 최소화 가능. (자가망구현)
- ③ 교량 무선계측기기 규격표준화에 따른 계측시스템의 과다 설계로 인한 불필요 예산 비용 절감 가능.
- ④ 실시간 교량 유지관리를 통한 사전 이상징후에 대한 사전예측으로 현장점검 투입인력 효율화에 따른 비용절감 가능.
- ⑤ 사전 위험신호 예측에 따른 시설물 사전 유지보수로 인한 비용 최소화 가능.
- ⑥ 본 연구를 통해 개발된 스마트 센서 노드 및 DAQ를 활용하여 다양한 분야 (환경, 수자원, 빗물 관리 분야 등)에 응용하여 활용가능.

#### (2) 교량 유지관리 분야의 새로운 패러다임 제시

- ① 저비용, 고효율이 가능한 무선 계측 시스템으로 클라우드 기반 Big Data 플랫폼 구현으로 센서 계측 데이터 및 각종 구조물의 상태, 기상 정보, 교통, 하중 정보 등을 포함한 통합 플랫폼을 구축이 가능.

- ② 통합 플랫폼을 통한 다양한 Data들의 특징을 추출하여 4차산업에 주요 핵심기술의 하나인 머신러닝, AI 기법 등이 적용된다면 향후 사회공공시설물에 대한 안전진단 유지관리 체계를 Big Data 분석을 통한 정보를 바탕으로 시설물들에 대한 유지보수 우선순위 등을 제공할 수 있어 선진화된 유지관리 운영체제로 발전가능.
- ③ 교량 무선계측기기 및 시스템에 대한 세부적인 가이드(안) 제시로 향후 국내에서 추진 되는 교량 계측시스템 구축시 관리기준 설정에 대한 기술자료로 활용기대.

## 다. 사회적인 기여도

- ① 상시 계측데이터의 확보 및 분석으로 Big Data 기반의 사전에 능동적으로 시설물 관리가 가능한 스마트 시스템 발전 가능.
- ② 단순화된 계측 시스템으로 인한 운용률 향상으로 시민안전 확보.
- ③ 상시계측 및 모니터링으로 비상상황시 즉각적인 전파 및 조치 가능.
- ④ 국내 운용중인 유지관리 시스템은 관리주체별로 다양한 형태의 시스템을 적용하고 있어, 계측시스템 및 관리기준 등의 신뢰성 검증이 어려운 상황임. 따라서, 표준화된 가이드(안) 제시로 비용절감 및 관리기준의 신뢰성 증가 기대.

## 3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

### (1) 주요내용

- ① 본 연구를 통하여 연구성과 및 성과점검 기준표에 제시한 정량적/정성적 목표는 100% 달성을 하였으나, 개발기술 성과품에 대한 신뢰성 확보를 목적으로 다양한 조건(대상 시설물, 외부조건, 센서개수 등)에서 실험을 하여야 하나 시간적/비용적 한계가 발생.
- ② LoRa 기반 센서 및 센서노드는 H/W 및 S/W측면에서 상용화 가능한 제품을 개발하였으나 센서의 가격에 대한 경제성과 향후 센서의 유지관리성을 고려할 경우, 제작비용, 장기적인 내구성능, 통신구현에 대한 각종 펌웨어 개선 및 업데이트가 필요함.
- ③ 향후 최종 목적인 LoRa LPWAN기반의 통합 유지관리 시스템 구축을 위해서는 수백가지의 센서들과 센서노드 등의 연결방안, 송수신 간섭 등의 문제들을 직접 설치를 통한 시행오차와 수정보완을 통하여 구현하여야 함.
- ④ 본 개발기술이 교량뿐만 아니라 다양한 분야(환경, 기타공공시설물 등)에 적용하기 위한 LoRa LPWAN 구현을 위한 추가적인 연구개발이 필요함.
- ⑤ 3차년도 주요 연구목표인 Influx DB기반 Big Data 플랫폼 구축을 위해 GUI를 구현하였으나 수집된 DB에 대한 분석을 통한 교량의 건전성 분야에 하나의 정보제공 뿐만 아니라 Data 수집, 처리, 추출 등의 최적화를 위한 플랫폼 수정보완 개선이 필요함.

### (2) 차후대책

- ① 위와 같은 개선사항에 대한 연구는 자체적으로 100% 달성하기에는 시간적/비용적인 한계가 발생되기 때문에 개발기술의 완성도를 높이기 위한 추가적인 후속 연구과제가 필요함.
- ② 후속 연구과제를 추진 할 경우, 아래와 같은 주제로 연구과제 추진이 필요함.
  - ㉠ 연구과제명 : LoRa LPWAN Test Bed 장기모니터링(1년이상) 및 상용화 기술 개발
  - ㉡ 주요 핵심연구내용
    - 기존센서 연동 및 가속도센서를 이용한 상용화 센서노드(DAQ포함) 제작기술 개발

- 
- 장기적인 내구성능을 갖는 하우징 제작기술 개발(KC인증 등 포함)
  - 다수 계측센서 통합 연동을 위한 네트워크 설계구성 방안 연구
  - 센서노드 무선통신을 위한 표준화 펌웨어 S/W기술 개발 연구
  - 상용화 SI 기반 플랫폼 구현 및 Big Data분석 기술개발 연구
-

## 제5장. 연구개발성과의 활용계획

### 1. 연구개발 성과 활용방안

| 과제명                                                      | 해당 기관명    | 핵심연구 성과물                                  | 요소기술                                                                              | 수요처                                                                                                                                                | 활용방안                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LoRa LPWAN 센서 네트워크 및 Big Data 플랫폼 기반의 무선 교량 유지 관리 시스템 개발 | (주)동일기술공사 | 통합모듈형 LoRa LPWAN 교량 무선계측 센서 보드 및 무선계측 플랫폼 | 1. MEMS기반 3축가속도계 및 온도계를 포함하는 통합센서 보드<br>2. LoRa 스마트센서노드<br>3. 기존 센서 입력을 위한 DAQ 보드 | ① 시설물 유지 관리 분야<br>- 공공기관 : 한국 시설안전공단, 한국도로공사, 서울시 등 전국 지자체 등<br>② 사회인프라 시설 (터널, 댐, 철도, 건축물 등) 시공관리 분야<br>- 종합건설기업 : 대림산업, 삼성물산, 대림산업, GS건설, 현대건설 등 | <ul style="list-style-type: none"> <li>공공기관 : 사회인프라시설 (교량, 옹벽, 터널 등)에 상태 점검을 위한 계측 시스템 보급 활용</li> <li>건설회사 : 건설 시공 중 시공단계별 공정관리 및 관리감독 목적으로 시스템 보급 활용</li> </ul> |

#### 가. 본 연구의 적용 범위 및 한계

##### (1) 적용 가능한 교량 범위

###### ① 특수교

- 본 연구에서 개발된 통합센서보드의 On board 3축 가속도계를 통해서 사장교, 현수교의 케이블 장력 계측 및 모니터링이 가능하며, on board 가속도계를 통한 주탑의 경사 계측과 보강거더 내 설치를 통한 모드 분석(Mode Analysis) 가능
  - On board 가속도계의 경우 sampling rate 가 125Hz이며, Nyquist 이론에 따라, 해석 가능한 주파수 영역은 62.5 Hz 수준임.
  - 사장교의 경우 길이가 짧은 케이블과 현수교 hanger cable 의 경우 고주파 특성으로 인해, 대상 케이블의 고유진동수가 현재 구현된 시스템의 계측 범위를 벗어날 수 있음.
- 기존 특수교 모니터링을 위해서 사용되는 가속도계 이외의 계측기는 역시 본 연구를 통해 개발된 DAQ와의 인터페이스를 통해 적용이 가능하며, 적용 가능한 계측기의 종류는 아래 일반교량에 적용할 수 있는 계측기와 같음.

###### ② 일반교량

- 일반 교량의 경우 기존 계측에 사용되는 계측기 및 센서의 계측신호를 본 연구를 통해 개발된 DAQ(Data Acquisition) 의 DIN 입력을 통해 LoRa 센서네트워크의 구축이 가능하며, 각 계측기의 output 종류에 따라 Analog(V-type, I-type, R-type) 신호 및 RS-232, RS-485의 디지털 출력의 처리가 가능하며, 현재 적용 가능한 계측기의 종류는 아래와 같음.
  - 신축변위계 / 부재 온도계 / 변형율계 / 응력계 / LVDT(Linear Variable Differential Transformer) / 풍향/풍속계

(2) LoRa 스마트 센서노드 최적 계측 조건 및 제한 조건

| 항목                   | 최적 및 제한 조건                                                                                                                                                                                             |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 전원                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- On board 가속도계 등 Dynamic data 를 사용하는 경우 상시전원 필요</li> <li>- Static Data를 위한 DAQ 인터페이스의 경우 배터리 동작이 가능하나, 계측기의 필요 전력이 큰 경우와 계측 및 송신 주기가 짧은 경우 상시 전원 필요</li> </ul> |
| 무선통신<br>관련           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- LoRa 무선통신의 경우 LOS 환경에서 5Km, non-LOS 환경에서 2Km 이내 권장</li> <li>- 보강거더 내부와 같은 구조물 내부에 설치할 경우, 콘크리트 재질의 경우 가능하나, 강교와 같은 철재 구조물 내부 설치는 제한됨</li> </ul>               |
| 계측기<br>인터페이스<br>관련   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 동시 입력처리의 경우 아날로그 4채널, 디지털 RS-232, RS-485 각 1개 채널 처리</li> <li>- 전압/전류 type 의 아날로그 출력을 가지는 계측기의 경우, 계측기 특성에 따라 op amp의 gain 값 수정을 위한 프로그램 필요</li> </ul>         |
| 확장성<br>(Scalability) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- LoRa 센서네트워크의 확장성은 페이로드(payload)의 크기와 계측 주기에 의해 결정되며, 1개 게이트웨이당 100개 이내의 센서노드 설치 권장</li> </ul>                                                                 |

## 나. 교량분야 사업화 추진 주요내용

(1) LoRa 기반 특수교 모니터링 시범사업(1년)

① 주요내용

- 본 개발기술 성과물을 통하여 2020년 한국시설안전공단과 공동으로 케이블장력계, 온도계, 신축변위계, 주탑 경사계를 포함하는 LoRa 기반 교량 유지관리 시스템 시범사업 추진예정.
- 본 연구를 통해 개발된 LoRa 기반 케이블 장력계와 1축, 2축, 3축 가속도계, LoRa 기반 DAQ 및 온도계, 신축변위계 등 40여개의 센서와 스마트 센서 노드, DAQ를 결합하여 그림 5.1과 같은 LoRa 사물인터넷 기반 무선 자동 모니터링 시스템 구축을 위한 추진예정.
- 특수교 시범설치를 통하여 향후 한국시설안전공단에서 운영 중인 특수교에 대한 본 개발기술 적용확대 및 공공기관(서울시, 한국도로공사 등) 관리 교량에 대한 무선 계측 모니터링 시스템으로 적용으로 사업화 확장 추진 예정

② 사업예산 : 168,300,000원

③ 시행시기 : 2020년 상반기

④ 적용대상 : 천사대교 (전남 신안군 소재)

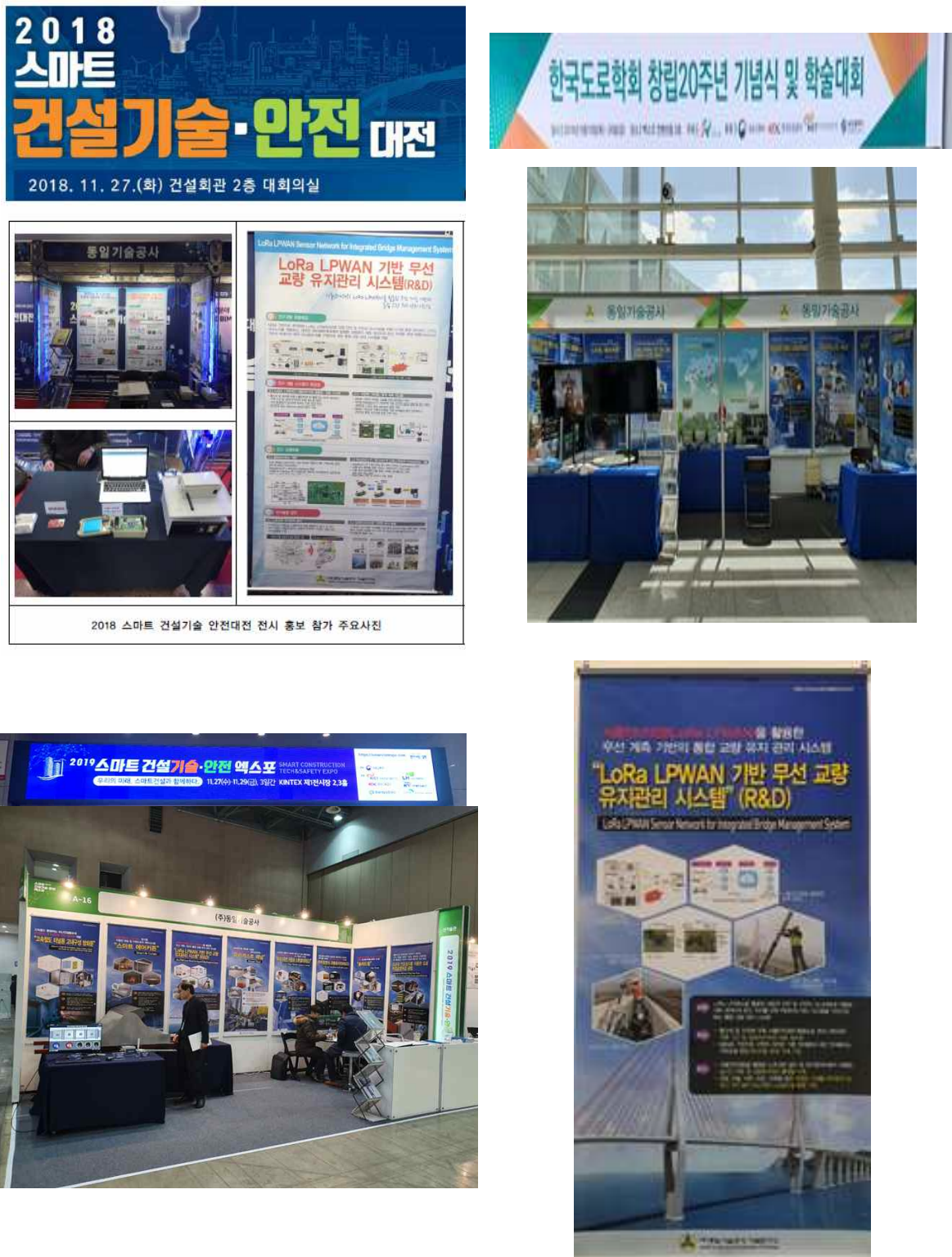
⑤ 진행상황 : 한국시설안전공단 및 국토교통부 보고 및 승인 완료



## 다. 기 타

### (1) 전시회를 통한 성과홍보 및 제품 설명회 개최

- 당사 개발기술에 대한 보급확대 및 기술의 우수성을 홍보하기 위해 그림 5.3과 같은 건설분야 관련 전시회 및 기술설명회 등을 참가하여 개발기술 활용 예정.



<그림 5.3> LoRa LPWAN 교량 유지관리 시스템 홍보 주요사진

---

## 2. 향후 연구 분야

### 가. Big Data

- ① 교량의 구조건전성 모니터링을 위한 계측의 경우 다수의 센서로부터 다량의 데이터가 지속적으로 발생하며, 향후 Big data 의 활용을 위해서는 다음과 같은 분야에서 후속연구가 진행되어야함.
  - 정보 보안성
  - 고속 처리(High Performance Computing)
  - 인공지능(Artificial Intelligence), 기계학습(ML : Machine Learning) 과 이들을 위한 Decision Making Model
  - 데이터베이스 시스템을 통한 데이터의 효율적인 저장(Storage) 및 복구(Retrieval) 방법

### 나. 현장 적용성 제고 방안

- ① 설치시 전원 공급
    - 정적데이터(static data)계측의 경우 배터리 사용이 가능하나, 현장 적용성 제고를 위해 향후 태양광 등의 energy harvest를 활용하는 방법을 고려하여야함.
  - ② 내구성
    - 본 연구에서 제작한 제품의 경우 IP67 등급의 방수/방진이 가능한 알루미늄 하우징과 방수 가능한 케이블을 사용해서 내구성을 확보하였으나, 하우징의 경우 고비용의 문제가 발생
    - 향후 상용화 단계에서는 최적의 금형을 통해 하우징의 내구성을 확보하고 단가를 낮추는 연구가 필요
  - ③ 데이터 안전성
    - 본 연구에서 제작된 센서노드는 외부저장장치로 sd-card를 장착하여, 계측기에서 발생하는 원시데이터(raw data)를 백업(backup)하며, 필요한 경우 스마트센서 노드에 내장된 wifi module을 통해 디바이스 분해없이 고속으로 백업하도록 설계되어 있으며, 이를 통해 데이터의 안전성을 확보
-

## 제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

### 1. 국내관련 기술동향 현황

#### 가. 기술현황 변화

- ① 통신사 중심으로 LoRa, NB-IoT 등 전국 사물인터넷 통신망이 구축됨에 따라, 다양한 어플리케이션을 통하여 사물인터넷 서비스 제공 준비 중이며, 도로, 철도, 터널, 사면 등의 다양한 사회공공기반시설 유지관리 시스템 적용을 위한 다양한 연구가 이루어 질 것이라 예상됨.
- ② 본 연구과제를 진행하는 동안 국내 통신사에서는 자사 LoRa 네트워크에 사용할 목적으로 독점 공급계약이 된 LoRa 송수신기 외에 한국 규격에 맞는 LoRa 송수신기 및 게이트웨이를 확보할 수 없었으나, 현재 국내 모듈 제조사에서 국내 규격에 맞는 제품들이 출시 준비 중이며 2018년 상반기에 제품 출시 예정임.
- ③ 대형 통신사를 중심으로 LoRa, NB-IoT 등 전국 사물인터넷 통신망을 구축 또는 계획하고 있으나, 각 통신단말 단위로 과금을 요구하는 통신사의 Business model로 인하여 많은 Data요금 발생으로 국내에 많은 시설물 유지관리를 위한 공공 분야 적용이 어렵기 때문에 지자체를 중심으로 경제적인 유지관리 시스템 구축을 위해 자가망 구축으로 사물인터넷 적용을 검토하고 있음.
- ④ 월콘테크놀로지, PL네트웍스, 바른전자 등의 국내기업들이 LoRa LPWAN 한국 표준 (KR920-923)을 적용할 수 있는 LoRa 모듈 및 게이트웨이 개발 및 출시되고 있음.

#### 나. 시장현황 변화

- ① 노후 시설물 급격한 증가에 따라 현재 운영 중인 시설물 유지관리 시스템의 개선에 대한 필요가 지속적으로 제기되고 있음.
- ② 국내에서도 4차 산업혁명이 빠른 개발속도가 진행됨에 따라 사물인터넷(IoT), Big Data, 인공지능(AI), 드론 등을 활용하는 방안을 적극 모색중이며, 최근에는 사물인터넷과 블록체인의 결합 등도 모색되고 있음.

#### 다. 경쟁기관현황 변화

- ① 최근에도 교량 구조 건전성 모니터링을 위한 계측은 주로 유선기반으로 운영되고 있으나, 경제성 및 효율성이 낮아 많은 시설물에 적용하기에는 한계가 발생.
- ② 따라서 IT전문 연구기관(KAIST, 부경대, 서울시립대 등)을 중심으로 무선 계측을 활용한 교량 구조 건전성 모니터링이 시도되었으나, 국외 UIUC에서 개발된 SHM-A, SHM-H 보드와 Imote2를 기반이며 LoRa, NB-IoT 등 다수의 사물인터넷 통신을 활용하는 모니터링을 하기에는 기술적인 한계가 발생.
- ③ 대형 통신사 중심으로 민간 및 공공 영역에서 LoRa, NB-IoT 등 사물인터넷 기술을 적용한 어플리케이션이 보고되고 있으며, 대표적으로 SK텔레콤과 한국전기안전공사의 LoRa 기반의 전기시설물 원격 관리, LG유플러스의 NB-IoT 기반의 도시가스배관에 대한 스마트배관 원격관리시스템등 개발되었음
- ④ 교량, 터널 등의 시설물 유지관리 분야에서는 KT가 한국시설물안전진단협회와 ‘사물인터넷(IoT) Big Data 분석 기반 SOC 시설안전 서비스’ 공동 사업 업무 협약을 통해 사물인터넷의 시설물유지관리 분야 적용을 추진

## 라. 지식재산권현황 변화

- ① 최근 다양한 분야(수자원, 환경, 시설물 모니터링 분야 및 재난 경보, 관리 등)로 사물인터넷이 응용됨에 따라, 사물인터넷 관련 특허 출원이 급증하고 있음.
- ② 본 연구에서 개발하고 있는 사물인터넷 통신망 기반 LoRa LPWAN은 대형 통신사인 SKT에서 다양한 원격검침, 사회적 약자 모니터링 등 다양한 어플리케이션에 대한 특허를 출원하고 있으나 사회기반 공공시설물 유지관리에 관한 특허 출원은 아직 많지 않은 상황임.
- ③ 사물인터넷 분야에 대한 H/W장치(게이트웨이 등) 및 3D 설계기반인 BIM 등과 융복합적인 기술에 대한 특허 등이 출원되고 있음

## 마. 표준화현황 변화

- ① 현재 시설물 유지관리에 적용할 수 있는 사물인터넷 통신은 비면허통신 대역인 ISM 대역의 LoRa 및 상용 사물인터넷 통신망인 LTE-M, NB-IoT 등이 있으며 SKT는 2016년 7월에 LoRa 전국망을 구축하여 BM을 추진하고 있으며, 2017년 7월에는 KT와 LGU+가 NB-IoT를 세계 최초로 전국망을 구축함
- ② LoRa 통신이 사용가능한 비면허 대역은 917~923 MHz로 RFID/USN 공동 사용 조건을 규정하는 무선설비규칙이 2017년 7월 26일 개정되었으며, 2018년 신고하지 않고 개설했을 무선설비의 기술기준이 개정됨

# 2. 국외관련 기술동향 현황

## 가. 기술현황 변화

- ① 3GPP release 13 표준화 및 LoRa, SigFox, Ingenu등 다양한 사물인터넷 프로토콜 개발로 어플리케이션 개발과 보급이 확대되고 있지만, 최적의 통신 인프라를 갖춘 국내 시설 기반 보급률은 낮으나 다양한 개발기술에 대한 Test Bed 및 상용화를 위한 많은 추진을 진행하고 있음.
- ② 3GPP의 표준으로 지정되어 있으며 LPWAN 기술인 LTE-M과 NB-IoT의 사업 확대가 LoRa, Sigfox 등의 비면허대역 기술대비 빠른 것으로 나타나고 있으며, 도이치텔레콤, 차이나텔레콤, 보다폰 등 대형 통신사를 중심으로 다양한 서비스를 제공하고 있음.

## 나. 시장현황 변화

- ① 2017년 시장조사기관 TMR 에 의해 발표된 시설물유지관리 시장의 규모는 2025년까지 매년 10.09%의 성장률을 보이며 2025년까지 북미에서만 시장 규모가 US \$1.31billion에 이를 것이며, 아시아-태평양 권역에서는 매년 11.38%의 성장할 것이라 발표함.

## 다. 경쟁기관현황 변화

- ① 세계적으로 가장 많이 사용되던 무선 계측 플랫폼 중에 하나인 Imote2 생산이 중단되어 더 이상 공급되지 않아 Libelium([www.libelium.com](http://www.libelium.com))에서는 LoRa, Sigfox, Zigbee 등 다양한 무선 표준을 지원할 수 있는 무선 계측 플랫폼(Waspote)을 출시함.
- ② 미국 소재의 Polysense는 LoRa 기반의 SHM(Structure Health Monitoring) 상용화 서비스를 시작하였으며 경사계, 가속도계 등 SHM에 적용할 수 있는 센서 및 환경 분야에 적용할 수 있는 센서를 내장한 LoRa 기반의 스마트센서노드를 제품화함.
- ③ 프랑스의 Nonolike의 경우 Nanosensors로 LoRa 기반의 센서 제품들을 제공하고 있음.

## 라. 지식재산권현황 변화

- ① LoRa, NB-IoT, SigFox 등 다양한 사물인터넷 프로토콜의 미들웨어, 어플리케이션 대한 특허출원수가 증가하고 있음.

## 마. 표준화현황 변화

- ① 이동통신 표준화 기구인 3GPP는 release 13으로 NB-IoT, EC-GSM-Iot, LTE MTC Cat-M1 기술을 표준으로 지정하였음.
- ② LoRaWAN 1.1 표준이 출시(2017년 10월)되었으며, 새로운 세션키(session key)를 포함하여 보안성이 강화되었고 Class B 지원, 새로운 MAC 명령어, 네트워크 간의 로밍 등에 대한 추가적인 표준들을 개정함.

## 제7장. 연구개발성과의 보안등급

### 1. 보안등급의 분류 및 결정사유

| 보안등급 분류 | 보안                                                                                                                                                                                                                     | 일반 |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|         |                                                                                                                                                                                                                        | ○  |
| 결정사유    | <ul style="list-style-type: none"><li>- 본 기술은 사물인터넷 통신기반 LoRa 네트워크 기술로 국가별로 정해진 기준에 대한 규정이 정해져 있음</li><li>- 본 기술을 사용하기 위한 국가별 지정 통신규약을 기준으로 구현을 하여야 하기 때문에 원천기술에 대한 국외 기술유출은 적다고 판단되어 보안등급은 일반으로 적용하는 것이 타당함</li></ul> |    |

## 제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

| 구입 기관   | 연구시설/<br>연구장비명 | 규격<br>(모델명) | 수량 | 구입 연월일 | 구입 가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화번호) | 비고<br>(설치 장소) | NTIS장비<br>등록 번호 |
|---------|----------------|-------------|----|--------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| 해당사항 없음 |                |             |    |        |               |               |               |                 |

## 제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

해당사항 없음

## 제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

| 번호 | 구분<br>(논문/<br>특허/<br>기타) | 논문명/특허명/<br>기타                                                   | 소속<br>기관명                             | 역할        | 논문<br>게재지/<br>특허 등록<br>국가 | 영향력<br>지수 | 논문 게재일<br>/특허 등록일 | 사사 여부<br>(단독 사사<br>또는<br>중복 사사) | 특기 사항<br>(SCI<br>여부/인용<br>횟수 등) |
|----|--------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------|---------------------------|-----------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1  | 논문                       | LoRa LPWAN<br>무선 통신을<br>활용한 교량<br>유지관리<br>시스템 적용성<br>연구          | (주)동일<br>기술공<br>사                     | 주관        | 한국구조물<br>진단유지관<br>리공학회    | -         | 2019.01           | 단독                              | 비SCI                            |
| 2  | 논문                       | 실시간<br>모니터링을<br>위한 LoRa<br>LPWAN 기반의<br>센서네트워크<br>시스템과 그<br>제어방법 | 한국시<br>설안전<br>공단                      | 공동        | 한국전산<br>구조공학회             | -         | 2018.12           | 단독                              | 비SCI                            |
| 3  | S/W                      | 로라 스마트<br>센서노드<br>운영시스템                                          | (주)동일<br>기술공<br>사                     | 주관        | 한국저작권<br>위원회              | -         | 2019.12.09        | 단독                              | -                               |
| 4  | 특허                       | Big Data 기반<br>능동형 교량<br>거더 인장응력<br>제어 장치 및<br>방법                | (주)동일<br>기술공<br>사<br>한국시<br>설안전<br>공단 | 주관/<br>공동 | 대한민국                      | -         | 2019.01.18        | 공동                              | -                               |

## 제11장. 기타 사항

해당사항 없음

## 제12장. 참고 문헌

---

1. 조수진, 윤정방, 심성한. (2014). 진동법을 이용한 사장교의 시공 중 장력 평가, 한국안전학회지, 29(2), 38~44.
  2. 김은진, 조수진, 심성한. (2015). 구조물 건전성 모니터링을 위한 스마트 센서 관련 최근 연구동향, 한국구조물진단유지관리공학회, 19(3), 10~21.
  3. 한국도로공사. (2017), 2016년도 연구보고서, 서해대교 계측데이터 관리기준치 수립연구
  4. Aloÿs Augustin1., Jiazi Yi., Thomas Clausen., William Mark Townsley. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Sensor, 16(9), 1466.
  5. Monika., Tajender Malik. (2016). A Review on Architecture of Wireless Sensor Networks in Structural Health Monitoring. International Journal of Engineering&Technology Innovations, 3(2), 25-28
  6. Ha, D. W., Park, H. S., Choi, S. W., Kim, Y.S. (2013). A Wireless MEMS-Based Inclinometer Sensor Node for Structural Health Monitoring. Sensor, 13(12), 16090-16104.
  7. Wang, J., Fu, Y., Yang, X. (2017). An intergrated system for building structural health monitoring and early warning based on an Internet of things approach. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017(1).
  8. Ramzi Shaladi., Faesal Alatshan., Chunhui Yang. (2015). An Overview on the Applications of Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks in Bridge Engineering. International Conference on Advances in Science, Engineering, Technology & Natural Resources (ICASETNR), Kota Kinabalu, Malaysia, 27-28 Aug. paper 4-11.
  9. Guowei Cai., Sankaran Mahadevan. (2016). Big Data Analytics in Online Structural Health Monitoring. International Journal off Prognostics and Health Management, 7(24), 1-11.
  10. Emerson Galdino., Alexandre Cury. (2016). Development of Low-cost Wireless Accelerometer for Structural Dynamic Monitoring. Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering(CILAMCE 2016), Brasília, Brazil, 6-9 Nov.
  11. Kim, S. K., Shamim Pakzad., David Culler., James Demmel., Gregory Fenves., Steven Glaser., Martin Turon. (2007). Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks. 2007 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, Cambride, USA, 25-27 Apr.
  12. Ahmed Abdelgawad., Kumar Yelamarthi. (2017). Internet of Things (IoT) Platform for Structure Health Monitoring. Wireless Communications and Mobile Computing, 2017, 1-10.
  13. 박태준, 이계선, 정운철, 최병철, 방효찬. (2017). LPWA 기반 IoT 전용 네트워크 기술동향, 전자통신동향분석, 32(1), 46-53.
  14. Jo, H. K. (2013), Multi-Scale Structural Health Monitoring Using Wireless Smart Sensors, University of Illinois at Urbana-Champaign, Ph.D Dissertation, Urbana, USA.
  15. Jang, S. N., Billie F. Spencer, Jr. (2015). Structural Health Monitoring for Bridge Structures using Smart Sensors(NSEL-035), University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA, Paper 165.
  16. S. Abinaya sindhu, C.A Nirrmala. (2015). Structural Health Monitoring using Wireless Sensor Network. International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE), 13(4), 319-322.
  17. Surgwon Sohn, Seong-Rak Rim., In Jung Lee. (2015). Vibration Measurement of Wireless Sensor Nodes for Structural Health Monitoring. Advanced Science and Technology Letters, 98, 18-22.
-

- 
18. Tracy Kijewski, Notre Dame, Martin Haenggi, Fitzpatrick Hall, Panos Antsaklis, Fitzpatrick Hall., (2006). Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring: A Multi-Scale Approach. 2006 ASCE Structures Congress, 17th Analysis and Computation Specialty Conference, st. Louis, USA, 18-21, May, Paper 16.
  19. B. Arun Sundaram, K. Ravisankar, R. Senthil, S. Parivallal., (2003), Wireless sensors for structural health monitoring and damage detection techniques. CURRENT SCIENCE, 104(11), 1496-1505.
  20. 김은주 박종웅, 심성한. (2016). 고속 철도 교량의 구조 건전성 모니터링을 위한 스마트 무선 센서 프레임워크 개발. 한국산학기술학회논문지, 17(5), 1-9.
  21. 박철한, 이홍일. (2016). 국내 교통 인프라 유지보수 투자의 향후 변화 추이, 한국건설사업연구원.
  22. 건설연구인프라운영원, (2016), 노후(철거)교량의 성능평가를 통한 공용중 교량의 장수명화 연구 기반 구축 기획연구 최종보고서, 건설연구인프라운영원.
  23. 노태문, 전영득, 여준기, 조민형, 김이경, 권종기. (2013). 센서 ROIC 기술 동향, 전자통신동향분석, 28(5), 83-92.
  24. 김정태, 박재형. (2010). 스마트 무선센서를 이용한 대형구조물의 구조건전성 모니터링, 한국소음진동공학회지, 20(1), 7-13.
  25. 조수진, 윤정방, Jerome P. Lynch. (2009). 장대교량의 케이블을 위한 무선장력계측시스템 개발, 한국전산구조공학회, 22(1), 14-17.
  26. Cho, S. J., Jerome P. Lynch, Lee, J. J., Yun, H. B., (2010), Development of an Automated Wireless Tension Force Estimation System for Cable-stayed Bridges. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 21(3), 361-376..
  27. Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pre Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Mila-segui, Thomas Watteyne(2017), Understanding the Limits of LoRaWAN, IEEE Communications Magazine,1-7
-

## 9. 뒷면지

### 주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.