DBpia

가속도, 변형률 센싱이 가능한 IoT 센서 및 클라우드 컴퓨팅 기반 교량 상시 변위 계측 관리 시스템

IoT Sensor and Cloud Computing for Ambient Bridge Displacement Monitoring

원종빈 | Jongbin Won | 중앙대학교 토목공학과 박사과정 **박준영** | Junyoung Park | 중앙대학교 건설환경플랜트공학과 4학년 재학중
신준식 | Junsik Shin | 중앙대학교 건설환경플랜트공학과 3학년 재학중 **강소행** | Sohaeng Kang | 중앙대학교 건설환경플랜트공학과 3학년 재학중
박종웅 | Jongwoong Park | 중앙대학교 사회기반시스템공학부 교수 **박민용** | Minyong Park | 반석안전주식회사 기술연구소 상무

1. 머리말

교량의 안전성 평가에 있어 변위 응답은 구조물의 거동 및 상태를 파악하는데 중요한 정보로 사용된다. 외부 하중에 의해 발생하는 과다한 변위는 구조물 안전성에 문제가 있음을 나타내는 지표로 이용될 수 있으며, 수치모델 개선, 손상 추정 등에 다시 이용될 수 있다. 따라서, 교량의 변위를 상시 계측할 수 있는 방법의 필요성이 대두되고 있다. 하지만 일반적으로 안전성 평가로 가장 많이 행해지는 교량의 내하력 평가에서는 변위 측정을 위해 교통 통제가 수반되며, 정적, 동적 재하 실험을 통해 변위를 계측한다. 이때 가장 보편적으로 사용되는 변위 측정 방식은 LVDT (Linear Variable Differential Transducer)를 사용한 방식으로, 이는 센서 양단을 각각 구조물의 변위 측정 위치와 하부 고정점에 설치하여 높은 정확도로 변위를 직접 계측할 수 있지만 LVDT 설치를 위한 가설구조물이 추가로 필요하다는 단점이 있다. 따라서 하천 또는 해상에 건설된 교량의 경우 LVDT를 이용한 변위 측정은 현실적으로 사용이 어렵다. 이런 한계점을 극복하고자, LDV (Laser Doppler Vibrometer), GPS (Global Positioning System), 영상 기반 변위 측정 등의 방식이 대안으로 사용되고 있으나, LDV는 장비의 가격이 높고, 교량 하부에 장애물이 있을 경우 설치가 제약된다는 점이 있으며, GPS의 경우 설치는 편리하나 교량의 변위를 측정하기에 정확도가 낮다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고자 가속계나 지오폰을 이용하여 측정된 가속도, 속도 성분을 적분하여 변위를 추정하는 방법들이 시도되었으나, 적분 시 필연적으로 발생하는 잡음의 누적으로 인해 왜곡된 변위 결과를 얻게 된다. 변형률을 통해 시간에 대한 적분이 아닌 공간 적분으로 변위를 얻는 방법들도 연구되었으나 중립축 및 물성치에 대한 불확실성으로 인해 정확한 결과를 얻을 수 없었다. 본 기사에서는 이러한 변위 측정의 어려움을 극복하고자, 다수 연구를 통해 검증된 가속도 및 변형률을 융합한 멀티메트릭 변위 측정 기법을 클라우드 서버상에 구현하였으며, 가속도 및 변형률 동시 계측이 가능한 IoT 센싱 시스템을 개발하였다. 본 기사에서는 개발된 다물리량 계측 IoT 센서 및 변위, 가속도, 변형률 처리를 위한 클라우드 시스템 및 이를 단기, 장기 교량 상시 계측에 적용한 사례에 대해 소개한다.

2. 다물리량 동시 계측이 가능한 IoT 센서 개발

본 연구팀에서 개발한 JANET Model-B는 24-bit의 고해상도로 최대 8채널 ADC가 탑재된 다채널 센서로서, 교량 현장에서 1000Hz의 계측 주파수로 3축 가속도와 3채널 변형률을 동시에 측정한다. JANET Model-B는 그림 1과 같이 방수방진이 가능하도록 패키징되어 있으며, 커넥터를 통해 아날로그 신호 및 변형률 측정이 가능하도록 설계되었다. 센서 내부에 필터링을 통해 100Hz ~ 1000Hz 범위에서 다양한 계측 주파수를 지원한다.

www.dbpia.co.kr

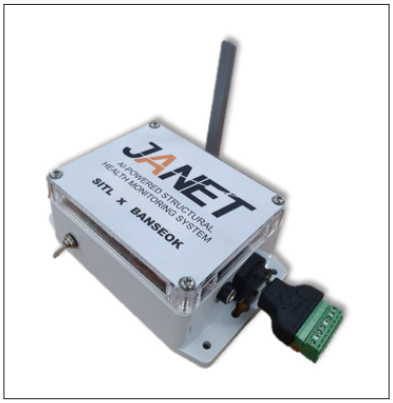


그림 1. 개발된 JANET Model-B 하드웨어 사진

JANET의 설치용도는 크게 (1) 연속적으로 데이터를 저장하는 단기 계측 모드와 (2) 진동이나 시간 기반의 이벤트로 작동하는 장기 운용 모드로 구성된다 (표 1).

종류	단기 계측모드	장기 운영모드
목적	내하력 평가	디지털 SOC
트리거	연속적인 데이터 기록	이벤트 발생 시 데이터 측정
데이터 전송방식	SD 카드에 연속 저장 블루투스를 이용한 데이터 확인	LTE-M 모뎀을 통한 직접 전송
전원공급	기본 배터리 + 추가 배터리	기본 배터리 + 태양광 충전
계측데이터	3축 가속도, 3채널 변형률, 온도, 습도	

표 1. JANET Model-B 계측모드

단기 계측모드에서 JANET은 데이터를 연속 계측하고 SD카드에 실시간으로 저장한다. 별도의 통신모듈을 이용해 데이터를 전송하지 않고 내장 SD카드에 저장하며 이는 현장에서 내하력 평가 시 변위를 계측하는 용도로 사용한다. 내하력 평가는 재하실험 일정에 따라 계측 시간이 길지 않고 시험 종료 후 현장에서 센서를 곧바로 회수할 수 있도록 단기 계측모드로 실시하며 또한 내장된 블루투스 모듈을 통해 실시간으로 스마트폰을 통해 계측데이터를 확인할 수 있어 작업 편의성이 높였다. JANET Model-B는 기본적으로 10500mAh의 배터리를 내장하여 최대 70시간 동안 연속 계측이 가능하며 추가 배터리 연결 시 한 달 이상의 연속 계측도 가능하다.

장기 운영모드는 장기 시설물 모니터링을 위하여 설계한 방식으로 전원 절약을 위해 연속 계측이 아닌 역치 이상의 진동이 발생하거나 지정 시간에만 계측을 수행하고 이후에는 초저전력 대기상태를 유지하는 EDS(Event Driven System)회로가 탑재됐다. EDS회로는 센서를 이벤트 대기모드에서는 1mA 이하로 유지하며, 태양광을 통해 상시 충전이 가능하여 배터리 교체 없이 장기간 운영할 수 있다.

단기 계측모드가 적용되는 내하력평가에서는 연속 계측 후 센서를 회수할 수 있어서 SD카드에 데이터를 저장하지만, 장기 운영모드는 데이터 회수를 위해 매번 SD카드를 탈부착할 수 없기 때문에 LTE-M 모뎀을 이용해 전처리된 계측 데이터를 클라우드 서버에 전송한다. 기존 IoT 센서의 데이터 전송방식은 크게 네 가지 방법이 주로 사용되는데(표 2), 빠른 전송속도, 게이트웨이 구성 불필요, 저전력 광역 통신망 등을 이유로 JANET Model-B는 LTE-CAT M1을 이용해 센서가 직접 서버로 데이터를 전송하는 stand-alone 시스템으로 구성된다. 따라서 현장에 센서 한대만으로 데이터 계측 및 전송이 완료되는 시스템으로 별도의 PC 및 데이터 전송을 위한 gateway의 설치가 요구되지 않는다.

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

표 2. IoT 센서 시스템 통신망별 스펙

3. 클라우드 시스템 개발

기존 대다수의 IoT 센서들은 센서 노드에서 계측을 포함한 데이터 처리를 수행하는 엣지 컴퓨팅(Edge Computing) 방식을 채택했으나, 이러한 방식은 무선 센서 연산성능의 한계 및 용량 부족 등의 문제로 인해 고급 연산 수행이 어려우며, 긴 연산시간으로 인해 초래되는 높은 소모전류는 센서의 장기 운용 간 안정성 문제를 야기했다. 이러한 문제를 획기적으로 해결하기 위해 클라우드 시스템(Cloud System)의 개념을 도입했으며, 클라우드 컴퓨팅을 통해 IoT 센서에서 수신한 원시 데이터를 기반으로 강력한 연산을 수행하여 변위 및 중립축을 자동으로 산출하도록 구성하였다.

1) 클라우드 서버 구성

클라우드 서버는 확장성이 높고 비용이 저렴한 AWS사의 리눅스(LINUX) 기반 EC2 서버를 사용하였다. LTE-CAT M1을 통해 전송된 데이터는 클라우드 상에 센서 노드 별로 포트(PORT)를 개방하여 항시 대기하고 있는 Node.js 기반 TCP/IP 서버를 통해 클라우드와 연결된다. 수신된 데이터는 즉시 센서 노드 별로 구분되어 있는 MySQL 기반 DB에 저장되며, 모든 데이터가 전송된 이후에는 Python 기반 Flask 서버를 통해 트리거 된 다양한 교량 해석 알고리즘을 강력한 클라우드 컴퓨팅을 통해 처리한다. 종합적으로 평가된 결과를 관리자에게 어플 및 웹 대시보드를 통해 제공하며 센서 시스템의 한 사이클을 마치게 된다.

2) 데이터 베이스 스키마

계측 데이터의 체계적인 DB 구축을 위해 교량 장기 모니터링에 적합한 자체적인 스키마를 정의하였으며, 구성된 DB는 크게 수신된 원시 데이터를 일시적으로 저장하는 Temporary DB와 Flask 처리를 통해 산출된 주요 물리량을 저장하는 Permanent DB로 구성된다.

Temporary DB는 Bridge 테이블과 Bridge_info 테이블로 나뉘며, Bridge 테이블에는 교량 ID, 데이터 ID, 계측된 3축 가속도 및 3채널 변형률의 원시 데이터가 저장된다. Bridge_info 테이블에는 센서의 일별 계측 횟수, 배터리 전압, 태양광 충전전류 등 센서의 상태를 관리하는 데이터를 저장한다. Temporary DB는 그 이름에서도 알 수 있듯이 데이터를 영구적으로 저장하지 않는다.

Permanent DB는 Temporary DB로부터 넘겨받은 데이터를 바탕으로 내장된 여러 알고리즘을 수행하고 연결된 Weather API를 통해 해당 센서 설치 위치에서의 온도와 습도를 불러온다. 주요 결과값들은 Bridge_flask DB에 저장되며, 추후 어플 및 웹 대시보드와 연동되어 관리자에게 시각화된 데이터가 제공된다. 추가적으로 DB에 데이터 전송 시 발생할 수 있는 보안 문제를 방지하기 위해 LTE-CAT M1으로부터 데이터 송수신 전 보안 토큰을 이용하여 서로 확인할 수 있도록 하였으며, 지정된 사용자만이 DB에 접근할 수 있도록 설계하였다.

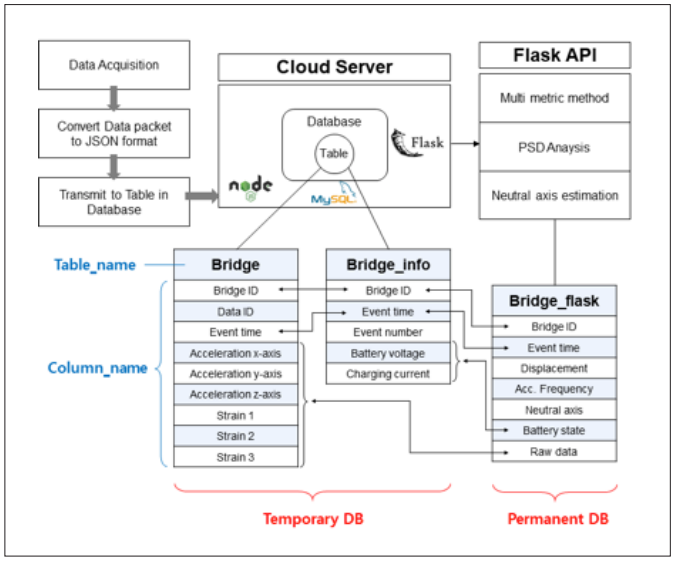


그림 2. JANET의 DB Schema

3) 데이터 처리 알고리즘

JANET Model-B는 클라우드 시스템을 기반으로 한 데이터 처리를 수행하기 때문에 컴퓨팅 자원에 대한 부담이 없어 폭 넓은 데이터 처리가 가능한 장점을 지녔다. 이 장에서는 클라우드 컴퓨팅 내 포함되어 있는 다양한 교량 안전성 판단 알고리즘 중 가장 핵심이 되는 2가지를 소개하고자 한다.

① 멀티메트릭 데이터 융합 기반 변위 산정 알고리즘

가속도는 변위의 이차미분으로 정의되므로, 가속도를 이중적분하면 이론적인 변위를 구할 수 있다. 그러나, 가속도계의 측정오차와 노이즈로 인해 수치적분을 통해 얻은 변위는 저주파의 큰 오차를 가지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 수치적분 시 발생하는 오차를 최소화하는 기법들이 제안되었으나 저주파 영역의 에너지가 필터링 되기 때문에 산출된 변위 또한 저주파 에너지의 손실이 발생한다는 한계가 있다.

이외에도 계측이 용이하며 저주파 에너지 성분 측정이 가능한 변형률을 이용한 변위 측정방법이 제안되었다. 변형률을 이용한 변위 추정방법은 변형률 모드형상 Ψ 와 변위 모드형상 Φ, 복수의 변형률 ε 로 변위 u 를 산출하는 방식으로 아래 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\{u\} = \Phi\Psi^{+}\{\varepsilon\} \qquad \text{식 (1)}$$

www.dbpia.co.kr

여기서 변위와 변형률 간의 관계는 모드형상을 가정하여 식 (2)와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\varepsilon_k(t) = \frac{y\pi^2}{L^2}\sum_j j^2 \sin\frac{j\pi x_k}{L} q_j(t) \qquad \text{식 (2)}$$

여기서 L은 교량의 길이, y는 등가 중립축의 위치, x_k는 변형률 센서의 설치위치, q는 모달좌표를 나타낸다. 변형률과 모드 변환 기반 변위 추정방식은 변위의 형태를 잘 나타낼 수는 있지만, 식 (2)에서와 같이 등가중립축에 대한 불확실성으로 인해 크기가 맞지 않는 결과를 초래한다.

② 등가중립축

식 (2)에서 등가중립축에 따라 산출되는 최종 변위의 크기가 종속됨을 알 수 있다. 등가중립축은 교량의 중립축과는 다른 개념으로 변위 산출 시 필요한 일종의 스케일 계수이며, 이는 가속도 기반 변위와 변형률 기반 변위의 동적 크기가 같다는 전제하에 아래와 같이 산출된다.

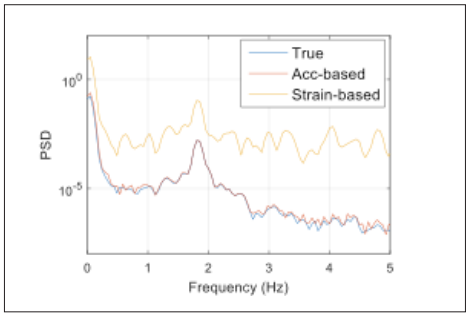


그림 3. 변형률 기반 변위의 주파수 매핑

$$a = \sqrt{\frac{S_{d,\mathrm{acc}}(f_n)}{S_{d,\mathrm{strain}}(f_n)}} \qquad \text{식 (3)}$$

여기서 $S_{d,acc}$는 가속도를 두 번 적분하여 산출된 변위, $S_{d,strain}$은 식 (1)을 통해 얻은 변위의 주파수 파워밀도함수를 의미한다. 두 변위의 동적크기는 물리적으로 같다는 가정하에 변형률 기반 변위를 보정하며, 이때 얻어진 스케일 계수를 등가중립축으로 명명하였다. 등가중립축의 경우 모드형상이 변화하지 않으면 변화가 없는 계수로, 이를 통해 구조물에 발생한 손상을 파악할 수 있으며, PSC 구조물에서 텐던의 장력 변화에 따라 등가중립축이 변화함을 실험적으로 검증하였다.

4. 검증 실험

앞서 소개한 JANET Model-B 시스템의 성능을 확인하기 위해 단기, 장기 모니터링 모드에 대해 실제 공용 중 교량을 대상으로 검증 실험을 수행하였다.

1) 단기 계측모드 : 조종천교

그림 4와 같이 강박스 거더 철도교의 내부에 센서를 설치하고 변형률 게이지를 센서가 설치된 위치로부터 양쪽으로 10m 떨어진 두 점과 센서가 설치된 위치, 총 세 점에 부착하였다. 기준 계측값으로 활용한 LVDT는 지형요건 상 우측 단부로부터 15m 떨어진 지점에 설치하였다.

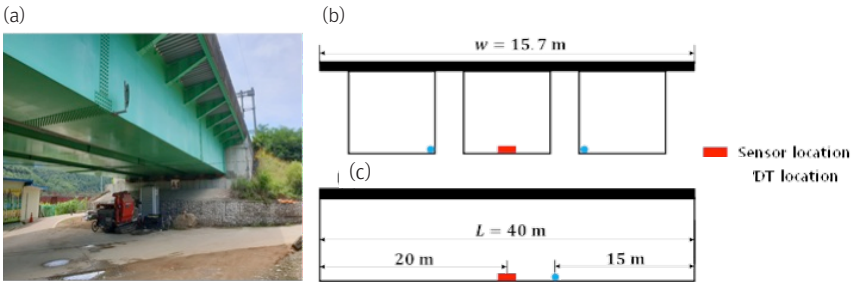


그림 4. 실험 구성: (a) 강박스 거더교, (b) 단면도, (c) 측면도

교량 형태	Span	변형률 게이지 설치 위치
Three-cell steel-box girder	40 m	10 m

표 3. 조종천교 실험 개요

열차가 통행하는 시점에 가속도와 변형률을 계측하고 (그림 5), 변위를 추정한 후 LVDT 변위계에서 계측한 변위 측정데이터와 비교한 결과, 추정된 변위가 측정값과 매우 가까운 것을 확인할 수 있다 (그림 6). 표 4에 따르면, 최대 변위 오차는 0.0015 mm로 0.17%의 오차율을 기록하면서 단기 모니터링 모드의 성능을 검증하였다.

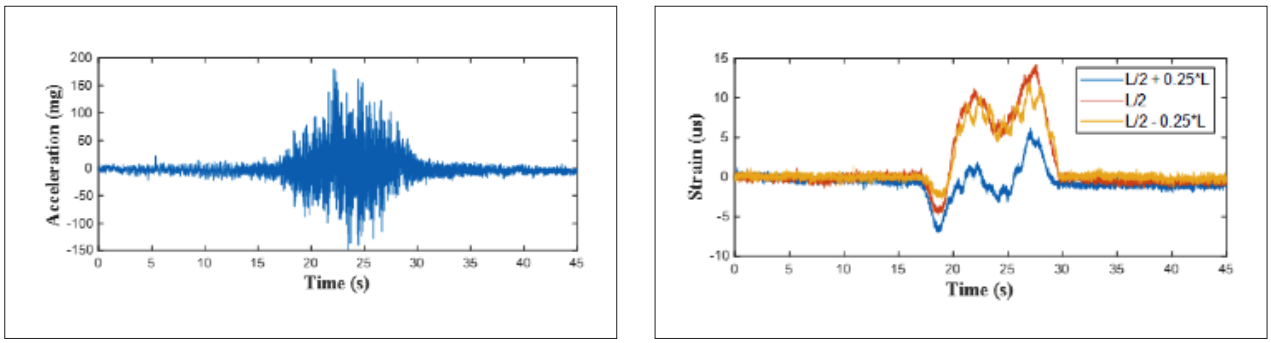


그림 5. 계측 결과 : (a) 연직 가속도, (b) 3채널 변형률

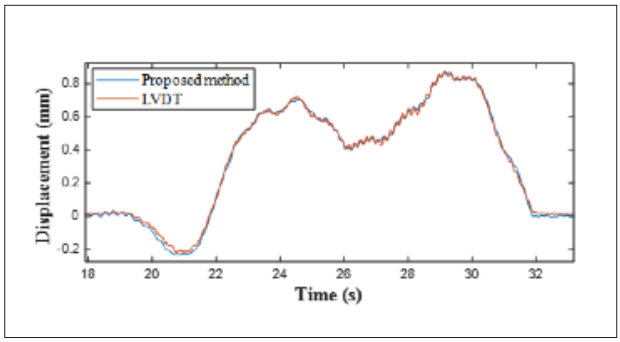


그림 6. 15 m 지점 추정 변위 비교

Method	Maximum Displacement (mm)	Error (mm)	Error (%)
Proposed method	0.8795	0.0015	0.17
Reference displacement	0.8780	–	–

표 4. 변위 비교 결과

검증된 시스템을 토대로 전국의 11개 교량에서 실증을 수행하였다. 그림 7의 좌측은 센서의 블루투스 기능을 이용하여 스마트폰을 통해 데이터를 확인하는 과정 및 1인이 센서를 설치하는 사진이며, 우측은 전국에 실증 실험을 수행한 내역을 나타낸다.

www.dbpia.co.kr



그림 7. 단기 계측 적용 사례: (좌) 센서 설치 모습 및 계측 전경, (우) 현장 적용 실적

2) 장기 운영모드 : 청담1교

청담1교는 강남구 삼성동과 송파구 잠실동 사이 탄천 하류의 올림픽대로에 있는 교량으로, 총 길이 450 m, 폭 18.5 m의 콘크리트 거더교량이다. 시스템은 태양광을 통해 지속적으로 운영이 가능하도록 설치하였으며, 과진동이 감지되면 계측을 시작하도록 설정하였다. 테스트를 위해 5월 22일부터 이벤트 발생 시 30초 응답을 계측하여 서버로 전송하도록 구성하였다. 변위 계측 시스템의 검증을 위해 현장에 링게이지 LVDT를 설치하고 G3 거더의 연직 변위를 측정하였다 (그림 8).

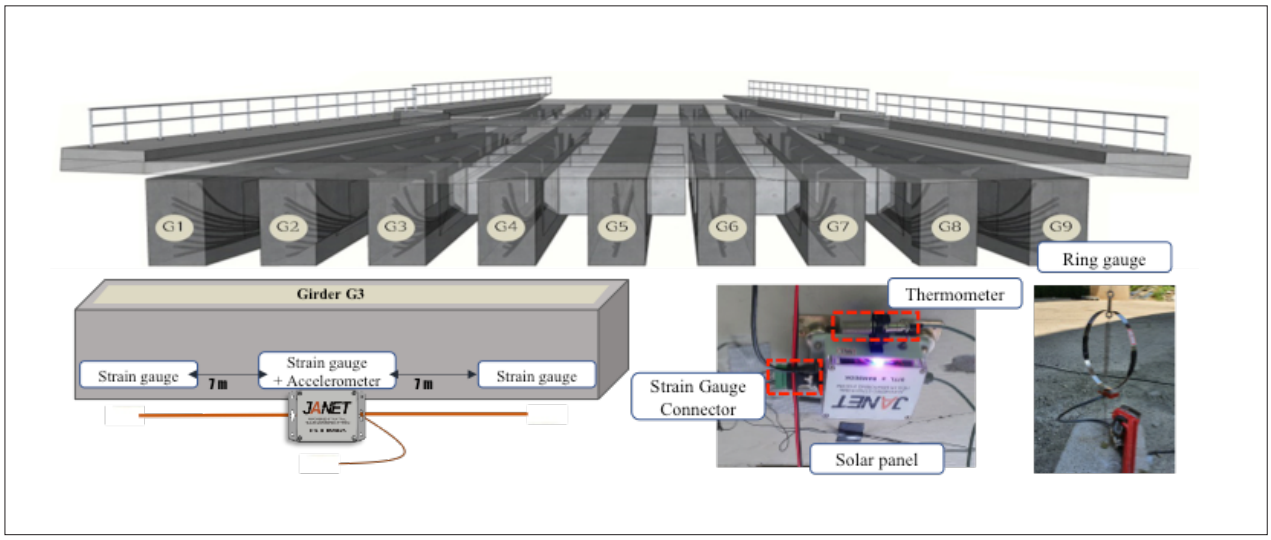


그림 8. 청담1교 단면도와 센서 설치 개요도

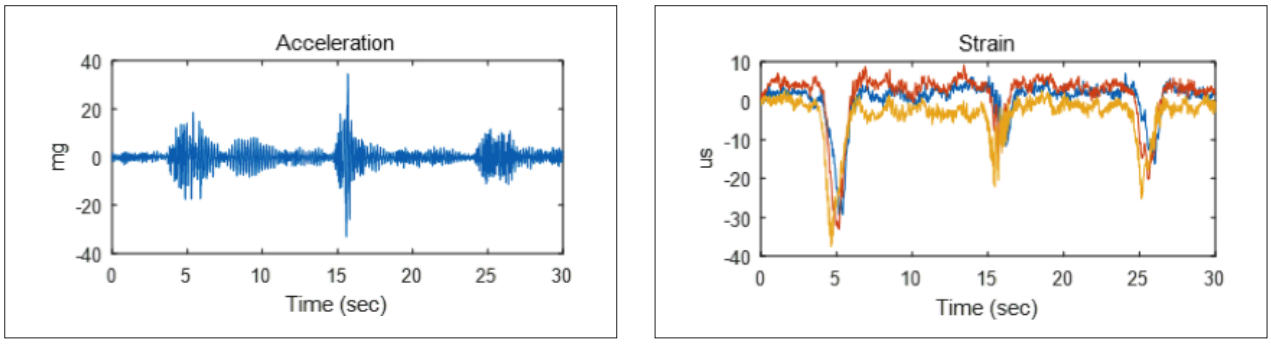


그림 9. 가속도, 변형률 계측 결과

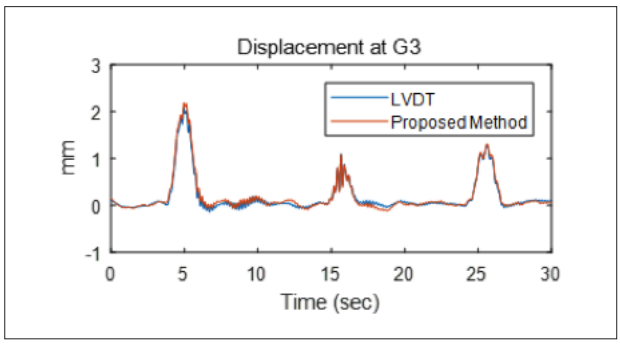


그림 10. G3 중앙부 지점 추정 변위 비교

계측 방법	첫번째 하중	두번째 하중	세번째 하중
LVDT	2.08 mm	1.01 mm	1.26 mm
JANET	2.18 mm	1.09 mm	1.31 mm

표 5. 추정/측정 변위 값 비교

그림 11은 한 달 이상 구동된 센서의 배터리 전압을 나타낸 것으로 설정된 충전 최대전압인 4.0V 이상의 전압을 유지하며 충전이 잘 되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 12의 계산된 변위의 분포를 보면, 0.5 ~ 0.7 mm의 변위가 주로 발생하였으며 2mm 내외의 최대변위가 발생함을 확인하였다.

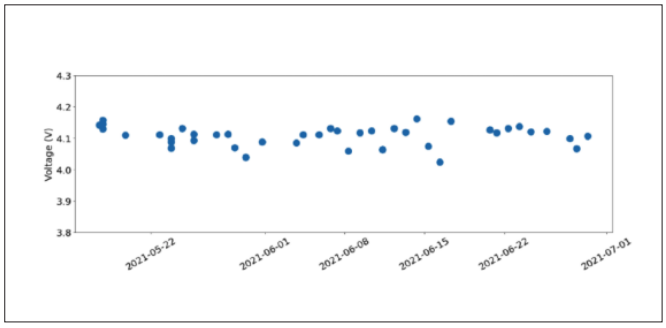


그림 11. 배터리 전압 분포도

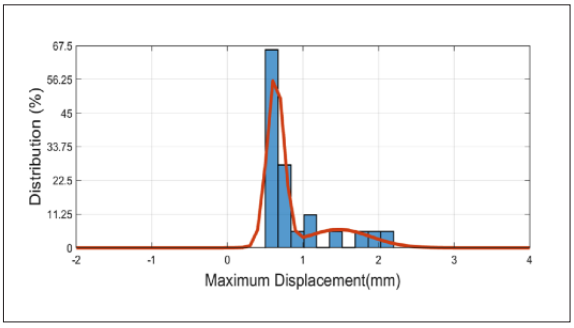


그림 12. 최대 변위 분포도

www.dbpia.co.kr

5. 맺음말

교량의 지속적인 안전성 모니터링은 중요하지만 구조물의 상태를 직접적으로 나태낼 수 있는 변위의 계측은 현실적인 계측의 어려움으로 제한되어 왔다. 본 기사에서는 연구팀이 개발한 다물리량 측정이 가능한 IoT 센서 시스템 및 클라우드 기반 자동화된 변위 산출 기법, 단기, 장기 모니터링 적용사례에 대해 소개하였다. 개발한 센서로 가속도와 변형률을 계측하고, 그 정보를 클라우드 서버로 전송하며, 클라우드 서버 내 연산 알고리즘을 통해 교량 평가 지표인 변위, 등가중립축, 고유진동수를 산정할 수 있으며, 본 방식은 보편적으로 사용하는 변위 계측 방식에 비해 센서의 설치와 데이터 계측, 그리고 데이터 수집이 용이하며 현장에서 쉽게 설치가 가능한 장점이 있다. 공용 중 교량인 조종천교와 청담1교에서 수행된 실험에서 교량의 연직방향 변위를 정확하게 측정할 수 있음을 확인하였고, 다수의 교량에 실증을 통해 단기 계측뿐만 아니라 장기 모니터링 모드의 효용성을 검증하였다. 센서 자체의 연산량을 줄이고 클라우드 컴퓨팅을 접목함으로써 다양한 알고리즘 적용으로 확장이 가능하며, 데이터베이스가 구축된다면 정밀한 교량 평가 플랫폼을 제공할 수 있으며, 향후 교량 안전성 모니터링의 효과적인 솔루션이 될 수 있을 것으로 전망한다.

해당 내용은 2021년 스마트 건설 챌린지 (https://www.youtube.com/watch?v=THjvSDMGcLk) 에서 발표영상으로 확인이 가능합니다.

WRITER INTRODUCTION



원종빈 박사과정은 중앙대학교에서 외관조사망도 작성 자동화에 관한 연구로 석사학위를 취득하였고, 현재 스마트 인프라 구조 연구실에서 박사과정을 밟고 있다. 주관심 연구 분야는 스마트 무선센서, 장기간 구조물 건전성 모니터링, 이미지 처리, 딥러닝이다.

sac1721@cau.ac.kr



박준영 학부과정은 중앙대학교 건설환경플랜트공학과 4학년 재학중으로현재 스마트 인프라 구조 연구실에서 학부연구생으로 지내고 있다. 주관심 연구 분야는 스마트 IoT 센서, 클라우드 컴퓨팅, SOC 디지털화이다.

pjy5451@cau.ac.kr



신준식 학부과정은 중앙대학교 건설환경플랜트공학과 3학년 재학중으로현재 스마트 인프라 구조 연구실에서 학부연구생으로 지내고 있다. 주관심 연구 분야는 스마트 IoT 센서, 클라우드 컴퓨팅, SOC 디지털화이다.

jacoom1030@cau.ac.kr



강소행 학부과정은 중앙대학교 건설환경플랜트공학과 3학년 재학중으로현재 스마트 인프라 구조 연구실에서 학부연구생으로 지내고 있다. 주관심 연구 분야는 스마트 IoT 센서, 위험 예측 시스템, 블루투스 통신이다.

rkdthgod1@cau.ac.kr



박종웅 교수는 한양대학교를 졸업하고 KAIST에서 스마트 센서 개발 및 구조물 손상 탐지에 관한 연구로 석사 및 박사 학위를 받았다. 졸업 후 일리노이주립대학교에서 박사 후 연구원을 마치고 2017년부터 중앙대학교 사회기반시스템공학부 재직중이다. 현재 주로 스마트 센서 개발 및 딥러닝을 이용한 손상 탐지에 관한 연구를 수행중이다.

jongwoong@cau.ac.kr



박민용 상무는 반석안전주식회사에서 안전진단에 관한 업무를 수행하고 기술연구소에 소속되어 있으며 안전진단에 관한 기술연구, 특허 및 신기술 개발에 대한 연구를 수행하고 있으며 현재 교량 재하시험에 대한 기술연구를 주요 기술개발로 실시하고 있다.

bss0030@hanmail.net

기획 | 사무국 solasys@ksce.or.kr