

고속 철도 교량의 구조 건전성 모니터링을 위한 스마트 무선 센서 프레임워크 개발

김은주¹, 박종웅^{2*}, 심성한³

¹한국건설기술연구원 화재안전연구소, ²일리노이주립대학교 건설및환경공학과, ³UNIST 도시환경공학부

Development of Wireless Smart Sensing Framework for Structural Health Monitoring of High-speed Railway Bridges

Eunju Kim¹, Jong-Woong Park^{2*}, Sung-Han Sim³

¹Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

²University of Illinois at Urbana-Champaign

³Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

요약 본 우리나라 철도 영업 구간중 철도교량은 2012년 기준 약 25%를 차지한다. 이러한 교량 구조들은 시공 직후부터 열차의 충격하중, 태풍, 선박 및 차량 충돌 등 다양한 하중을 받게 된다. 특히 고속 철도 교량의 경우, 열차의 속도로부터 전가되는 매우 큰 충격하중을 받게 되며, 이러한 교량에 가해지는 충격 응답을 분석하는 것은 교량의 안전성 평가에 매우 중요하다. 최근 무선 센서를 이용해 교량의 건전성을 평가하는 연구들이 주목받고 있다. 무선 센서는 가격 및 설치의 용이성으로 인해 교량의 응답계측에 유용하게 적용되고 있다. 하지만 고속철도 교량에서 발생하는 충격 하중은 그 지속시간이 10 초 내외로 매우 짧게 발생하므로, 기존 무선 센서의 시스템의 자체 실행 후 시간 지연으로 인해, 이러한 충격하중의 계측은 매우 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 철도 교량의 충격하중에 의한 구조물의 응답을 계측하기 위한 하드웨어 및 소프트웨어 프레임워크를 제안한다. 구체적으로 1) 초저전력 가속도계를 이용한 구조물의 과도응답 감지 및 평가, 2) 무선 센서 네트워크의 트리거링 후 계측이 시작되는 지연 시간의 단축, 그리고 네트워크의 시간 및 데이터 동기화 기법을 개발하였다. 최종적으로 제안된 프레임 워크에서 소수의 진동 감지 센서 노드들이 상시진동을 계측하며, 열차의 진입으로 인한 진동이 감지될 시, 전체 센서 네트워크의 계측을 시작한다. 시간 지연을 최소화하기 위해 모든 센서는 다른 시작시간을 가지며, 이를 제어하기 위해 후처리 기반 시간 동기화를 한다. 제안된 프레임워크는 실내실험 및 수치해석을 통해 그 효용성을 입증하였다.

Abstract Railroad bridges account for 25% of the entire high-speed rail network. Railway bridges are subject to gradual structural degradation or fatigue accumulation due to consistent and repeating excitation by fast moving trains. Wireless sensing technology has opened up a new avenue for bridge health monitoring owing to its low-cost, high fidelity, and multiple sensing capability. On the other hand, measuring the transient response during train passage is quite challenging that the current wireless sensor system cannot be applied due to the intrinsic time delay of the sensor network. Therefore, this paper presents a framework for monitoring such transient responses with wireless sensing systems using 1) real-time excessive vibration monitoring through ultra-low-power MEMS accelerometers, and 2) post-event time synchronization scheme. The ultra-low power accelerometer continuously monitors the vibration and trigger network when excessive vibrations are detected. The entire network of wireless smart sensors starts sensing through triggering and the post-event time synchronization is conducted to compensate for the time error on the measured responses. The results of this study highlight the potential of detecting the impact load and triggering the entire network, as well as the effectiveness of the post-event time synchronized scheme for compensating for the time error. A numerical and experimental study was carried out to validate the proposed sensing hardware and time synchronization method.

Keywords : Post time synchronization, railway bridge, wireless smart sensor, structural health monitoring, high speed train

본 논문 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원 (16SCIP-B066018-04)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Jong-Woong Park((Univ of Illinois at Urbana-Champaign)

Tel: +1-217-898-3275 email: jongwoon@illinois.edu

Received April 18, 2016

Revised May 4, 2016

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

1. 서론

우리나라 여수 무궁화호 탈선 (2016), 스페인 AVE 열차 탈선사고 (2013), 일본 Shinkansen 열차 탈선 사고 (2012), 중국 CRH3 고속열차 추돌 사고 (2011) 등 세계 각지에 열차 사고로 인하여 많은 인명 및 재산 피해가 발생하고 있다. 이러한 사고로 인해 열차의 안전성에 대한 불안감이 커짐에 따라 국내 지형여건상 철도선로의 큰 부분을 차지하고 있는 철도 교량에 대한 관심도 매우 높아지고 있다. 도로 교량과 달리 철도 교량은 설계에 적용되는 크기의 크기 및 특성에서 많은 차이가 나며, 지속적으로 반복되는 고속 중량의 열차하중에 의한 진동 특성 및 처짐과 가속도 등 동적응답과 피로현상 및 공진 가능성이 있다. 우리나라 철도 노선의 연장은 3,380km에 이르고 있으며 이 중 교량은 총 연장 271.2km로 전체의 8%에 달한다. 열차 노선의 경우 철도 교량의 노후화로 인해 전체 교량 중 30년 이상의 교량이 56.0%를 차지하고 있으며 이들의 안전성 평가를 위해서 현장 계측을 통한 진단이 필요하며 전체 철도 교량의 주행 안전성 판단을 위해 효율적인 교량 모니터링 시스템의 개발이 요구된다.

급속히 발전하고 있는 스마트 무선 센서 네트워크 (Wireless Smart Sensor Network, WSSN) 기반 모니터링 시스템은 저비용, 높은 계측 해상도, 다 물리량 계측, 그리고 무선 통신이 가능하여 최근 학계 및 산업계에서 크게 주목받고 있다[1-4]. 하지만 WSSN 기반 시스템에서는 전력소비 문제로 인해 센서 네트워크가 상시 구동할 수 없으며, 일반적으로 사용자의 명령 하에 정해진 시간 동안 계측을 수행한다. 이로 인해 열차의 통행 시와 같이 빠르고, 예측이 어려운 경우는 WSSN을 통한 진동 계측

이 거의 불가능하였다. 이러한 어려움을 극복하고자, 연구자들에 의해 몇 가지 기법이 제안되었다.

Bischoff 등은 철도 교량의 변형을 모니터링을 위하여 변형률계와 가속도계가 통합된 센서 노드를 개발하였다 [5]. 개발된 노드는 상시 가속도를 측정하며 철도가 교량에 진입하는 순간 발생하는 가속도로 인해 트리거 되어 통행 중의 변형률을 계측한다. 하지만 다수의 센서가 공존하는 네트워크 규모의 계측이 아닌, 오직 하나의 센서를 통한 계측이라는 한계점을 가지고 있다.

반면에 Spencer 등은 전체 무선네트워크를 트리거링 하여 데이터를 계측하는 시스템을 구축하였다 [3,6,7]. 연구팀은 한국의 제2진도대교에 111개소의 스마트 무선 네트워크를 설치하였으며, 상시 진동을 계측하여 센서 네트워크를 깨우는 센트리 노드(Sentry Node)를 개발하였다. 이는 감시자 역할을 하는 센서 노드로, 설정된 시간 간격마다 깨어 짧은 시간동안 가속도를 계측하고, 만일 계측한 값이 정해진 범위를 넘을 시, 베이스스테이션(Base Station)에 통보하여 전체 네트워크를 트리거링한다. 이 기법을 통해 태풍 통과 시 발생하는 과도한 응답을 자율적으로 계측하는 것에 성공하였다.

하지만, 센트리 노드가 깨어 전체 네트워크를 트리거링 하기까지 일정 시간이 소요되므로, 충격하중과 같이 지속시간이 짧은 응답은 계측하기 어렵다는 단점이 있다.

현존 하는 무선 센서 네트워크에서 시간 지연 (센서가 트리거링된 후부터 실제 계측을 수행하기까지는 시간)이 발생하는 이유는 데이터 동기화를 위해 센서 노드들의 시간을 동기화하기 때문이다. 현재까지 제안된 무선 센서 네트워크의 데이터 동기화 기법은 크게 두 가지이며,

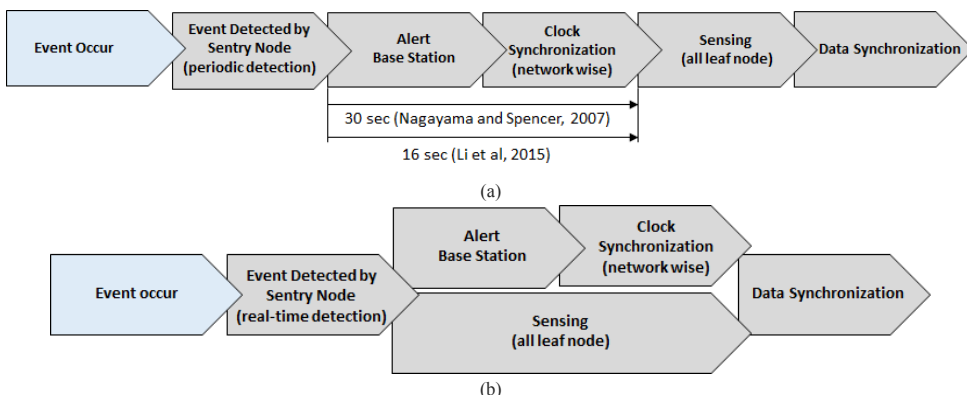


Fig. 1. Time synchronization in wireless sensor network: (a) previous approach; (b) proposed approach

두 방법을 그림 1a에 도식화하였다. 첫 번째 방법은 센서의 내부시계가 선형적으로 발생하는 오차를 갖는다는 전제에 따른다. Nagayama and Spencer [8] 는 (1) 계측이 시작되기 전 기준 센서가 네트워크에 약 30초간 비콘 신호를 보내 각 센서 간의 시간 속도, 절댓값 오차를 보정하고, (2) 계측이 끝난 후 시간동기화 오차를 보정하는 두 단계의 데이터 동기화 기법을 제안하였다. 이후 Jian 등 [9] 은 각 센서 노드들의 내부시계가 자체 온도 상승으로 인해 비선형 거동을 하는 것에 착안하여, 비콘 기준 시간 데이터를 센서 노드로 주기적으로 송신하도록 설계하였으며, 계측이 완료된 후 내부시계의 비선형 오차를 보정하는 Post 데이터 동기화 기법을 제안하였다.

기존에 제안된 무선 센서 네트워크의 동기화 기법은 구조물에 충격을 감지하는 경우, 센트리 노드를 통한 주기적인 응답 계측을 통해 이뤄지며 전원절약을 위해 대략 10분 주기로 수행된다[10]. 센트리 노드에서 충격을 감지하는 경우, 베이스 스테이션으로 통보하며, 여기서부터 전체 네트워크를 시간동기화 하는데 걸리는 시간은, Nagayama and Spencer 의 경우 30 초, Li et al 의 경우 최소 16 초 이상이 소요된다. 즉, 기존 연구의 경우, 교량에 충격이 발생한 후부터 최대 10분 30초가 지난 후에 계측이 수행된다는 큰 단점이 발생한다. 고속 철도 빠른 통행 속도로 인해 기존의 시간 동기화 방법의 적용이 불가능하며, 즉각적으로 응답을 계측하기 위해서는 실시간 충격 하중 감지 기법과 시간 동기화 기법의 개발이 요구된다.

본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하고자 Fig.

1b 와 같은 새로운 구조를 통한 철도 교량 동기화 방법을 제안한다. 전체적인 프레임 워크는 Fig. 2 와 같다.

- 1) 교량의 충격하중 취약부 (교량 캔트부, 연장 경간 등)에 설치된 상시 계측 센서를 센트리 노드로 설정한다. 열차 진입으로 인해 선로에 강한 충격이 전해질 때 센트리 노드가 스스로 감지한다.
- 2) 센트리 노드는 초저전력 가속도센서로 상시구동하며 저장기능(First In, First out, FIFO)을 통해 트리거 되기 전, 즉 열차의 교량 진입 전 데이터를 저장한다. 열차의 진입 시 발생하는 진동으로 센트리 노드가 트리거되면 스스로 데이터를 내부에 저장하는 동시에 네트워크의 나머지 센서들을 깨우기 위해 베이스스테이션에 전체 네트워크에 계측을 시작하라는 메시지를 전송한다. 센트리 노드가 다른 센서들에 비해 계측을 미리 시작하므로, 센서들 간의 계측 시작 시간 차이가 발생한다.
- 4) 계측이 끝난 후 베이스스테이션에서 시간오차를 계산하여 시간동기화를 수행하며, 이를 통해 열차 통행 전후에 계측된 데이터를 동기화시킨다.

본 논문에서는 제시된 프레임워크를 구현하기 위하여

- 1) 충격하중을 감지하고 트리거 신호를 보내기 위한 초저전력의 가속도 센서 기반의 센트리 노드의 프레임워크 제안 및 가능성 검증 그리고 2) 센트리 노드 트리거링을 통해 계측을 시작할 때 발생하는 전체 네트워크의 시간오차 보정을 위한 시간동기화 알고리즘 제안 및 가능성을 검증하고자 한다.

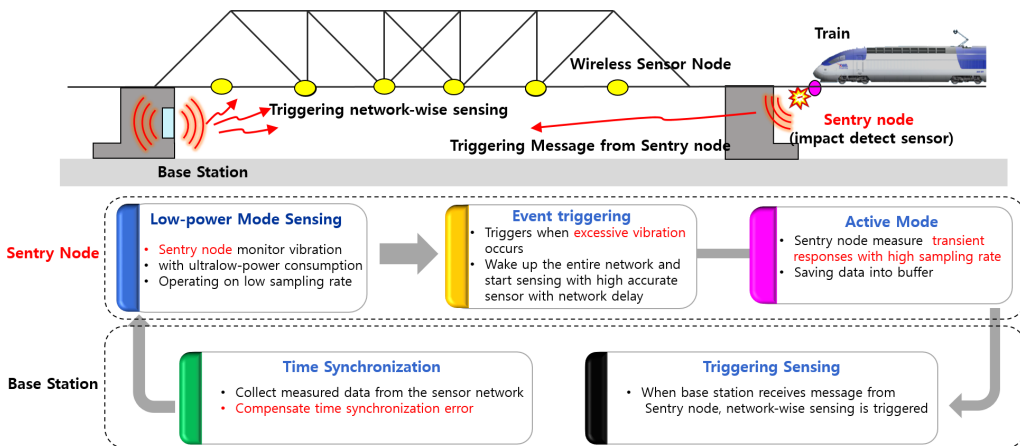


Fig. 2. Impact sensing framework

2. 상시 충격 감지를 위한 센트리 노드

2.1 MEMS 기반 충격 감지 센서

충격 응답 계측을 위한 센트리 노드는 저전력의 가속도계로 상시계측이 가능하며, 최대 기준 가속도 (threshold) 이상의 진동이 올 경우, 신속하게 스마트 무선 센서 노드에 신호를 보내며, 동시에 충격 전후의 데이터를 메모리에 저장할 수 있어야 한다. 본 연구에서 위와 같은 조건들을 만족시키기 위해 Microelectromechanical systems (MEMS) 기반의 초저전력 가속도계를 활용하였다. 상용 MEMS 가속도계 중, 낮은 전력 소모와 큰 FIFO 버퍼를 갖춘 Analog Device사의 ADXL362 [11]를 선택하였다.

표 1에 제시된 ADXL362는 MEMS 기반의 3축 가속도계이며 이는 전원절약을 위해 활성화와 비활성상태를 지원한다. 비활성상태에서 초저전력으로 계측을 수행하기에 전원절약이라는 큰 장점이 있는 반면 계측주파수가 6Hz로 제한된다는 것과 노이즈 레벨 (즉 350 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)이 높다는 단점이 있다.

활성화상태에서는 12.5Hz ~ 400Hz로 다양한 범위의 계측 주파수를 가지며, 또한 노이즈 레벨이 175 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 비활성상태에 비해 2배 이상 낮다는 장점이 있다. 하지만 전원소비는 15 μA 로 비활성모드에 비해 10배 이상 소모량이 크다는 단점이 존재한다. 전원 소모 측면에서는 활성화상태가 많은 에너지를 필요로 하는 것 같지만, 이는 일반적인 스마트 센서 전력소모인 169 mA (ISM400의 경우)에 비하여 매우 미미한 수준이다 [12]. 계측 Analog-to-digital (ADC) 해상도는 12 bit 이다.

Table 1. ADXL362 specification [11]

Model	ADXL362
Measurement	3-axis acceleration
ADC Resolution (Bit)	12
Sampling Rate (Hz)	12.5 ~ 400@active
	6@Inactive
FIFO size(samples)	512
Power Consumption (μA)	15@active
	0.27@inactive
Noise Density ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	380@normal mode 175@active mode

2.2 Arduino Uno

MEMS 기반의 디지털 센서 ADXL362를 구동하기 위해서 스마트 센서 플랫폼인 Arduino를 사용하였다. Arduino는 오픈소스를 기반으로 한 단일 보드 마이크로컨트롤러로 아트멜(Atmel)사의 8비트 AVR 마이크로컨트롤러와 프로그래밍 및 다른 서킷들과의 결합을 용이하게 해 주는 부속품들로 구성되어 있다. Arduino의 가장 큰 장점은 마이크로컨트롤러를 쉽게 동작시킬 수 있다는 것이다. 이 중 Arduino Uno는 8 비트 마이크로컨트롤러인 ATmega328을 기반으로 구성되며 보드에는 기본적으로 5V, 3.3V 전압 16MHz의 진동자, 14개의 디지털 I/O핀을 제공한다. 디지털 핀을 통해 디지털 입/출력 및 Serial Peripheral Interface (SPI), I2C 통신이 가능하다.

2.3 센트리 노드의 소프트웨어 흐름도

ADXL362를 이용해 구조물에 발생하는 충격을 감지하고 트리거링 하기 위하여 그림 3 과 같은 센트리 노드의 소프트웨어 흐름도를 구성하였다.

1. 센서는 사전에 정의된 값으로 초기화 된다. 정의가 가능한 값의 종류는 계측주파수(fs), 트리거되기 전의 저장 할 데이터 수(No. of FIFO), 전력 모드 (활성화, 비활성화 상태)가 있다.
2. 센서는 기본적으로 비활성모드로 6Hz로 작동하며 상시진동을 계측한다. 계측된 진동이 정해진 값을 넘게 되면 (예, 100 mg) 활성화상태로 전환하며 정해진 샘플링 주파수(fs)로 계측을 수행한다.
3. 활성화상태에서 센서는 자체적으로 디지털핀을 통해 'high'값을 보내며 이는 Arduino Uno의 GPIO 입력핀을 통해 차후 네트워크 트리거링에 이용된다.
4. 위의 3의 과정과 동시에 FIFO 버퍼의 저장기능이 활성화되며 최대 512 개의 3축 가속도 데이터를 저장한다.
5. FIFO 버퍼에 저장기 끝나면, Arduino Uno는 저장된 충격 응답을 불러들인다.
6. 충격 감지 센서는 다시 비활성상태로 전환되어 상시 진동을 감지한다.

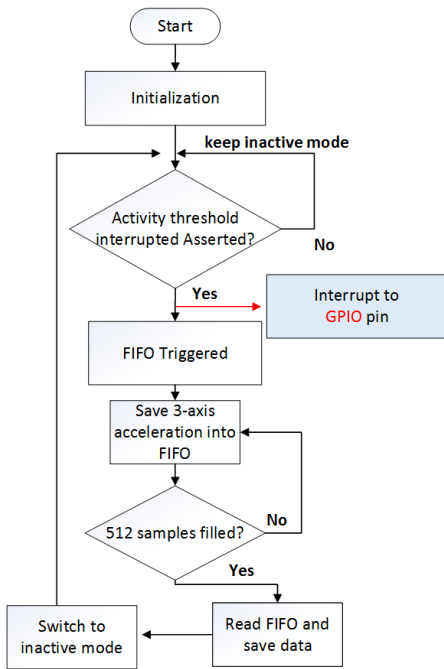


Fig. 3. Flowchart of ADXL362 operation

2.4 센트리 노드의 충격 감지 성능평가

제안된 센트리 노드의 충격 감지 및 트리거링 성능을 파악하고자 실내실험을 수행하였다. 성능 비교를 위해 ICP[®] 가속도계로 가속도 측정 정확도를 비교하였으며 임팩트 해머(impact hammer)를 통해 가진이 이루어지는 정확한 시간을 측정하였다. ICP[®] 기준가속도계 및 충격 망치의 신호를 측정하기 위해서 24bit 고성능 데이터 수집 장치인 Vibpilot을 사용하였으며 계측주파수는 4096 Hz로 하였다. 또한 Vibpilot을 이용하여 ADXL362가 트리거 될 때 나오는 신호도 함께 측정하였다.

실험을 위해 6층 전단건물 모형을 사용하였으며, 건물의 5층에 그림 4과 같이 ADXL362, Arduino Uno 그리고 기준 가속도계를 설치하였다. 총 10번의 실험을 수행하였으며 임팩트 해머를 통해 실험 당 총 1회의 가진을 하였다. 실험에서 사용된 ADXL362의 설정변수는 설정 트리거 응답의 크기는 200mg, fs는 100 Hz, No. of FIFO는 512 샘플로 설정하였다. 총 2가지의 실험을 수행하였으며 각각은 다음과 같다.

Case 1: 비활성상태에서 시작하여 트리거 된 후 활성 모드로 전환하는 경우

Case 2: 비활성상태 없이 활성상태만을 계속 유지하는 경우

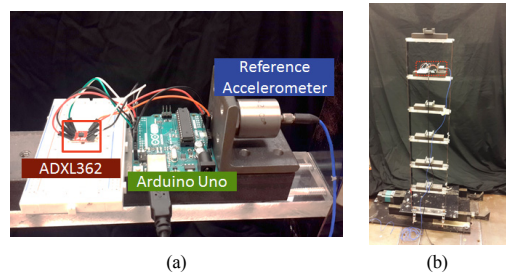


Fig. 4. Experimental setup: (a) Composition of sensors;(b) 6-story shear building

Case 1의 경우 비활성상태가 6Hz의 낮은 계측 주파수를 가지므로 응답속도가 늦을 것으로 예상되며, 이와는 반대로 case 2의 경우 활성상태에서 설정된 100Hz의 높은 계측 주파수로 실험을 수행하여 빠른 응답을 기대하였다.

센서의 평균 응답속도 및 소모 전력은 표2에 나타내었으며, 계측 가속도 및 트리거링 신호는 그림 5 와 같다.

실제 충격 응답의 최댓값 계측에 있어서, 기준 가속도계에서 4,096 Hz로 계측된 충격 응답은 5,000 mg 근처로 ADXL362의 6Hz (비활성상태)로 계측된 값보다 월등히 크게 나왔으며 이를 통해 충격 응답의 정확한 크기 계측은 어려움을 알 수 있다. 하지만 응답의 경우 큰 지연이 없었다. Case 1의 경우 임팩트 해머에 의해 가진된 시간인 보다 약 평균적으로 0.357 초 뒤에 트리거가 시작되었으며 Case 2의 경우는 임팩트 해머와 트리거 시간 차이가 평균적으로 0.0133초로 Case 1에 비해 약 10 배 정도 응답속도가 빨랐다.

응답 속도 면에서 Case 2와 같이 상시 활성상태로 작동하는 편이 낫지만, 전력소모를 비교해보면 하루에 10 번의 트리거가 발생한다고 가정할 때 Case 1의 경우는 0.0214 mW, Case 2의 경우 1.18 mW로 거의 50배 이상의 차이가 발생하였다. 만약 에너지 하베스팅을 통해 소요전력이 충분히 공급된다면 Case 2를 사용하는 경우가 빠른 응답을 계측한다는 점에서 더욱 효율적일 것이라 판단된다.

Table 2. Experimental result

Case	Average Time Lag (s)	Power Consumption (mW/day)
Case 1	0.357 s	0.0214
Case 2	0.0133 s	1.18

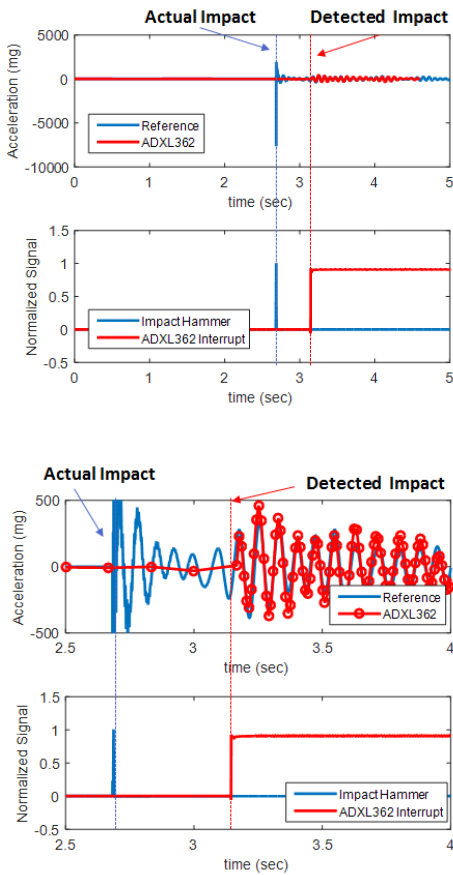


Fig. 5. Time delay in impact response: (a) Case 1; (b) Case 2

3. 후처리 기반 센서 네트워크 동기화 기법

3.1 센트리 노드를 통한 시간 동기화

센트리 노드가 충격 감지하여 베이스스테이션에 알리고 네트워크를 트리거링 하는 경우, 지연시간은 최소화되나, 각 센서 노드들마다 계측 시작이 다르게 된다. 이렇게 비동기화된 계측 신호는 구조물의 정밀한 동적특성 파악, 특히 손상 정도의 정확한 판단에 큰 영향을 미친다. 예를 들어 동기화 되지 않은 데이터를 이용해 구조물의 동적특성인 모드형상을 추출하는 경우, 위상차이가 발생하여 잘못된 모드형상이 추출되며 이는 false positive 손상 검출 등의 결과를 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 새로운 후처리 (post event) 기반 데

이터 동기화 기법을 그림 6와 같이 제안한다. 그림 6은 센트리 노드내부의 흐름도로, GPIO핀을 통해 트리거가 되는 순간부터 후처리 기반 시간동기화가 이뤄지기까지의 과정이며, 다음과 같이 동작한다.

1. 센트리 노드는 초전력 충격하중 감지 가속도계로부터 트리거링 신호가 감지될 경우 (GPIO핀으로부터) 계측을 시작 한다.
2. 센트리 노드는 동시에 베이스스테이션에 충격하중이 감지되었음을 알리는 신호(beacon signal)를 보낸다. 따라서 전체 센서 네트워크는센트리 노드보다 지연된 계측 시작 시간을 갖는다.
3. 네트워크의 계측이 시작이 되면 베이스 스테이션은 기준 시간 정보를 송신한다. 이 때, 센트리 노드의 계측 중 받은 기준 시간 정보는 센서 노드 내부에서 수신한 신호 도착 시간과 함께 배열 (array) 형태로 저장하게 된다.
4. 계측이 끝난 후 첫 번째 기준 시간과 마지막 기준 시간에 의거하여 동기화 시킬 데이터의 구간을 정하게 되며, 센서 노드 내부의 시간이 베이스스테이션에서 송신한 기준 시간 배열을 통해 보정 된다.

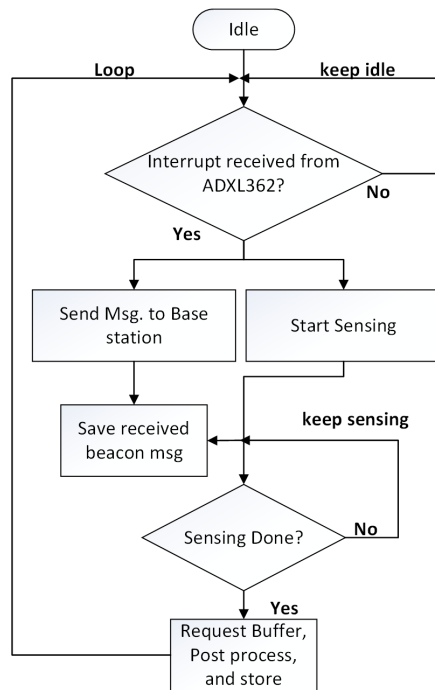


Fig. 6. Post-event synchronization scheme in a sentry node.

보정을 통해 센서 노드의 시간오차 중 offset과 누적되는 비선형 드리프트가 보상되어 베이스스테이션과 일치하는 시간정보를 갖게 된다. 이 때 계측 상 packet 충돌, task 간의 충돌들로 인한 오차는 선형보간법과 Cook's distance outlier 등으로 보정된다[9]. 첫 번째 기준시간 이전의 데이터는 보정된 내부시간에 의거하여 따로 내부 메모리에 저장된다.

기존의 네트워크상에서의 시간 동기화 방법들은 모든 센서의 계측이 모두 동일한 시간에 시작한다는 전제 하에 진행하였으며, 이 경우 계측의 시작과 끝 시간을 알 수 있었다. 하지만, 제안된 프레임워크에서는 모든 센서들의 계측 시작 시간이 다르며, 계측에 소요되는 시간을 베이스스테이션의 시간을 기준으로 계측 데이터의 시간 오차를 보정하는 것이 특징이다.

그림 7은 센트리 노드, 베이스스테이션 그리고 일반 센서 노드를 간의 메시지 전송 시간 차이를 나타낸다. 센트리 노드는 가장 먼저 트리거되어 베이스스테이션에 계측 시작 시간을 통보하며 이때 Δt_1 의 시간이 소요된다. 메시지를 받은 베이스스테이션은 전체 센서 네트워크에 계측 시작 메시지를 보내며 이때 걸리는 걸리는 시간은 Δt_2 이다. 무선 통신의 불확실성을 고려하여 이 단계에서 총 N번의 메시지를 발송하는 경우, $N \times \Delta t_2$ 가 소요된다. 확실하게 메시지를 전달하기 위해서 여러 번 전송한다. 마지막 시간오차는 베이스스테이션에서 각 센서들에게 기준시간을 제공할 때 소요되는 Δt_3 이다. 따라서 총 소요되는 시간 지연은 센트리 노드의 경우 $\Delta t_{sentry} = \Delta t_1 + N \times \Delta t_2 + \Delta t_3$ 이며 일반 센서 노드들의 경우 Δ

$t_{node} = N \times \Delta t_2 + \Delta t_3$ 이다. 베이스스테이션이 처음으로 기준시간을 보낼 때를 새로운 계측 시작시간으로 정의하며 계측이 진행되는 동안 센서 노드들은 베이스스테이션이 실시간으로 보내는 기준시간데이터를 저장하므로 센서 내부 시간과 외부에서 수신한 절대 기준시간을 비교하면 offset과 드리프트를 구할 수 있다.

3.2 후처리 기반 동기화 기법의 수치적 검증

센트리 노드와 센서 노드의 샘플링 주파수를 280 Hz로 설정하였으며 시간오차를 구현하기 위해 각각 +3.5%와 -2%의 시간 오차를 주었다. 샘플링 주파수를 280 Hz로 설정한 이유는 대부분의 교량 구조물의 경우 주된 고유진동수가 Nyquist 주파수인 140 Hz에 비해 매우 작기 때문이다.

센트리 노드와 센서 노드의 계측 시작시간을 달리하였으며, 베이스스테이션으로부터의 기준 시간은 매 5초마다 발생한다고 하였다. 이 베이스스테이션 기준신호의 전송 지연시간은 0.2 ms로 설정하였고, 내부 시계의 속도는 대표적인 무선 센서노드 중 하나인 Imote2의 시계속도인 13 MHz로 하였다.

그림 8은 두 센서의 시간 보정 전 시그널을 이용한 파워 스펙트럼이다. 실제 센서들 사이의 속도 오차는 추정 불가능하기 때문에 타겟 샘플링 주파수를 이용하여 구조물의 진동수를 추정할 경우, 최대 4.3%의 추정 오차를 가져올 수 있다는 것을 알 수 있었으며 결과는 표 3에 정리되어 있다. 본 논문에서 제안된 방법에 따라 센트리 노드와 센서 노드의 시간을 보정한 결과를 그림 9에 나타내었다.

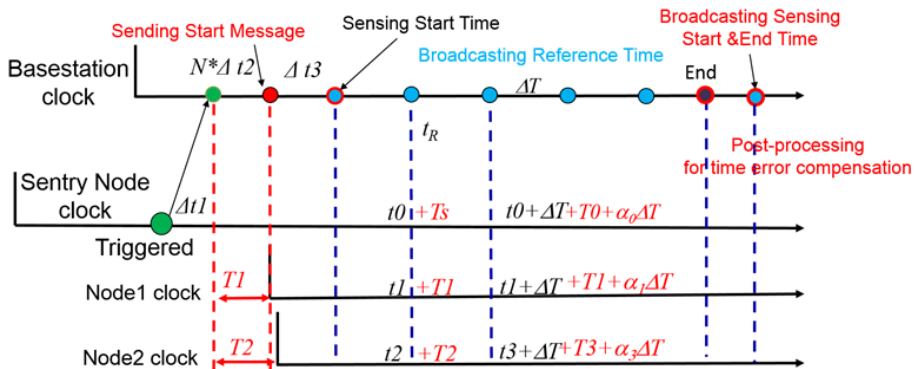


Fig. 7. Time flow in base station and sensor nodes

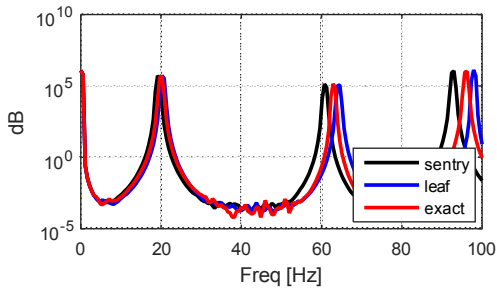


Fig. 8. Natural frequency extracted from different sensor nodes

Table 3. Change in natural frequency due to time synchronization error

Case	Target	Sentry <error>	Leaf <error>
1	20 Hz	19.14 Hz <4.3%>	20.23 Hz <-1.15 %>
2	63 Hz	60.71 Hz <3.64%>	64.53 Hz <-2.43 %>
3	96 Hz	92.97 Hz <3.15 %>	97.89 Hz <-1.97 Hz>

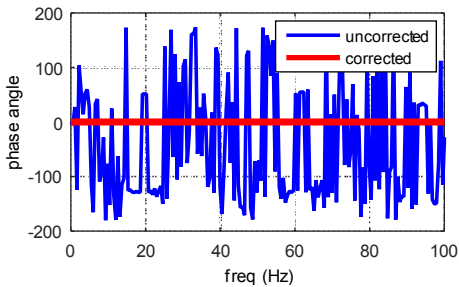


Fig. 9. Corrected time error

시간오차를 표현하기 위하여 센트리 노드와 센서 노드의 Cross Power Spectrum Density (CPSD) 함수를 구한 후 그 함수의 각의 기울기의 정도를 이용해 수치적으로 표현하였다. 즉, 다음의 식(1)을 사용 하였다.

$$error = \frac{\theta}{2\pi} \times 10^6 (\mu s) \quad (1)$$

여기서 θ 는 CPSD의 angle을 나타낸다. 그림 9 에서 나타나는 바와 같이 보정 전 두 센서 간의 상관관계 (correlation)는 계측 시작 시간의 오차, 두 센서 내부의 시계 속도 오차에 의해 상당히 랜덤하게 나타난다. 하지만 본 연구에서 제안된 방법을 통해 시작 시간 오차를

보정 하고, 속도 오차를 보정할 경우 두 센서 간의 계측 신호 사이의 오차는 전 진동수 범위 내에서 0° 에 가까운 값이 나타난다. 제안된 알고리즘 상 오차가 무시될 정도이므로, 실제 무선 센서 에 적용하였을 때 발생 할 수 있는 최종오차는 우연 오차 (random error)만을 포함하게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 스마트 센서 모니터링 시스템을 철도 교량의 건전성 평가에 적용하기 위한 프레임워크를 구성 하였다. 스마트 센서의 경우 저비용, 설치의 편리함, 높은 신뢰성 등으로 많은 각광을 받고 있지만, 전력소모로 인해 상시구동이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 이에 따라 철도 교량과 같이 전국 주요 도시 및 거점을 연결하는데 주요한 구조물들의 예측 불가능한 충격하중을 감지하고 건전성 평가를 할 수 있는 기술이 필요하다. 본 연구를 통해 순간적인 충격하중을 감지하고 전체네트워크에 계측 시작 신호를 보내는 하드웨어 시스템과 계측 수행 후 각기 시작시간이 다른 센서들의 계측 데이터를 시간동기화 시키는 프레임워크를 제안하였다.

상시 트리거링을 위해 초전력 MEMS 가속도 센서 ADXL362를 사용하였으며 성능평가를 위해 아두이노 플랫폼과 결합하였다. 하드웨어 성능평가를 위해 ADXL362와 Arduino Uno를 진단건물에 설치하여 외부에서 작용하는 충격 신호에 대해 얼마나 빠르게 반응하는지 평가하였다. 이를 통해 상시구동 시 약 0.357초의 빠른 반응속도를 얻어낼 수 있었다.

각기 계측 시작 시간이 다른 센서 네트워크를 동기화 하기 위한 후처리 기반 시간 동기화 기법도 제안되었다. 베이스스테이션이 전체네트워크의 시작과 끝나는 시간을 알 수 있으므로 사후에 이를 전체 노드에 전송하여 시간오차를 보정하는 기법을 제안하였으며 수치해석을 통해 타당성을 검증하였다. 수치해석결과 센서 노드들 간의 CPSD의 위상이 0° 로 매우 정밀한 보정 결과를 보여주었다. 정밀한 동기화 오차 분석을 위해서는 차후에 센서 및 네트워크의 실제 노이즈 특성을 고려한 연구가 필요하다.

References

- [1] Tomonori Nagayama, and Billie F. Spencer Jr. "Structural health monitoring using smart sensors." NSEL Report Series. Report No. NSEL-001. November 2007.
- [2] Jerome P. Lynch, and Kenneth J. Loh. "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring." Shock and Vibration Digest 38(2), pp.91-130, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0583102406061499>
- [3] Billie F. Spencer, Jr. et al., "Recent advances in wireless smart sensors for multi-scale monitoring and control of civil infrastructure." Journal of Civil Structural Health Monitoring, 6(1), pp.17-41, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-015-0111-1>
- [4] E.-J. Kim, S. Cho, and S.H. Sim., "A Recent Research Summary on Smart Sensors for Structural Health Monitoring." Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 19(3), pp.10-21, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2015.19.3.010>
- [5] R. Bischoff, M. Jonas, E. Ola, F. Glauco, and E. Lennart. "Event-based strain monitoring on a railway bridge with a wireless sensor network." Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Zurich, Switzerland, 2009.
- [6] R. A. Jennifer et al., "Flexible smart sensor framework for autonomous structural health monitoring." Smart Structure and Systems, 6(5-6), pp.423-438, 2010.
- [7] J. W. Park et al., "Long-term structural health monitoring system of a cable-stayed bridge based on wireless smart sensor networks and energy harvesting techniques." 5th World Conference on Structure Control and Monitoring, Japan, 2010.
- [8] T. Nagayama, S. H. Sim, Y. Miyamori, and B. F. Spencer, Jr., "Issues in structural health monitoring employing smart sensors," Smart Structure and Systems, 3(3), pp.299-320, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2007.3.3.299>
- [9] L. Jian, K. A. Kiril, R. E. Kim, B. F. Spencer, Jr. "Efficient time synchronization for structural health monitoring using wireless smart sensor networks." Structural Control and Health Monitoring, 23(3), pp.470-486, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/stc.1782>
- [10] S. Jang et al., "Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation." Smart Structures and Systems, 6(5-6), pp.439-459, 2010.
DOI: http://dx.doi.org/10.12989/sss.2010.6.5_6.439
- [11] Analog Devices, ADXL362 Specification, Available at: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL362.pdf>, last visited: 2016.03.01
- [12] J. W. Park, H. J. ung, H. Jo, and B. F. Spencer, Jr., "Feasibility study of micro-wind turbines for powering wireless sensors on a cable-stayed bridge" Energies, 5(9), pp.3450-3464, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en5093450>

김 은 주(Eunju Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한양대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2010년 6월 : 미국 일리노이 주립대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2015년 5월 : 미국 일리노이 주립대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2016년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 화재안전연구소 전임 연구원

<관심분야>

구조동역학, 구조물 안전성 모니터링, 화재 안전

박 종 웅(Jong-Woong Park)

[정회원]



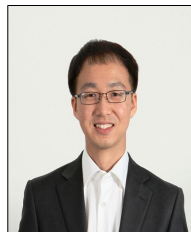
- 2007년 2월 : 한양대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2009년 9월 : KAIST 건설및환경공학과 (공학석사)
- 2013년 8월 : KAIST 건설및환경공학과 (공학박사)
- 2013년 9월 ~ 2013년 12월 : 한국해양과학기술원 연구교수
- 2014년 2월 ~ 현재 : 일리노이 주립대학교 박사후연구원

<관심분야>

구조 동역학, 센서 융합, 스마트 센서

심 성 한(Sung-Han Sim)

[정회원]



- 2000년 2월 : KAIST 건설및환경공학과/물리학과 (공학사/이학사)
- 2002년 2월 : KAIST 건설및환경공학과 (공학석사)
- 2011년 5월 : 미국 일리노이 주립대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2011년 7월 ~ 2015년 8월 : 울산과학기술대학교 도시환경공학부 조교수
- 2015년 9월 ~ 현재 : 울산과학기술원 도시환경공학부 부교수

<관심분야>

구조동역학, 구조물 안전성 모니터링, 스마트 센서