

# 구조물 모니터링을 위한 무선 스마트 센서 네트워크의 칼만 필터 기반 데이터 복구

김은진<sup>1</sup>, 박종웅<sup>2</sup>, 심성현<sup>3\*</sup>

## Kalman Filter-based Data Recovery in Wireless Smart Sensor Network for Infrastructure Monitoring

Eun-Jin Kim<sup>1</sup>, Jong-Woong Park<sup>2</sup>, Sung-Han Sim<sup>3\*</sup>

**Abstract:** Extensive research effort has been made during the last decade to utilize wireless smart sensors for evaluating and monitoring structural integrity of civil engineering structures. The wireless smart sensor commonly has sensing and embedded computation capabilities as well as wireless communication that provide strong potential to overcome shortcomings of traditional wired sensor systems such as high equipment and installation cost. However, sensor malfunctioning particularly in case of long-term monitoring and unreliable wireless communication in harsh environment are the critical issues that should be properly tackled for a wider adoption of wireless smart sensors in practice. This study presents a wireless smart sensor network(WSSN) that can estimate unmeasured responses for the purpose of data recovery at unresponsive sensor nodes. A software program that runs on WSSN is developed to estimate the unmeasured responses from the measured using the Kalman filter. The performance of the developed network software is experimentally verified by estimating unmeasured acceleration responses using a simply-supported beam.

**Keywords:** Data recovery, Kalman filter, Wireless smart sensor, Wireless smart sensor network

### 1. 서 론

사회기반시설물의 노후화로 인해 안전에 대한 인식과 요구가 높아짐에 따라 구조물의 현재 상태 평가 및 모니터링에 관한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 구조물 건전성 모니터링(Structural Health Monitoring, SHM)은 이러한 목적으로 개발되어 현 구조물의 상태를 평가하고 진단하며 추후 모니터링에도 유용하게 사용될 수 있다. 기존의 SHM을 위한 기술은 주로 유선 기반의 센싱 방식이었고 이는 비교적 장비의 가격이 높고, 구조물에서의 케이블 설치 등 실 적용에 어려움이 있다.

보다 효율적인 모니터링을 위해 무선 스마트 센서(wireless smart sensor)가 SHM 분야에 도입되었고(Straser and Kiremidjian, 1998), 이후 무선 스마트 센서 내에서의 연산이나 무선 통신 범위, 배터리 효율 등의 성능을 향상시키고 다양한 SHM 분야에서의 활용도를 높이기 위해 활발한 연구가 이어지고 있다.

무선 스마트 센서의 네 가지 주요 특징은 1) 데이터 계측 및 임베디드 데이터 연산(embedded data processing), 2) 작은 크기, 3) 무선 통신, 4) 저렴한 가격이다(Spencer et al., 2004). 기존의 유선 기반 센싱 시스템에서는 케이블 설치와 유지에 막대한 비용이 소모되었으나, 무선 스마트 센서의 무선 통신 기능은 시스템 설치와 유지에 소요되는 비용을 크게 줄일 수 있다. 또한 센서의 연산 기능을 이용하여 손상 추정, 시스템 식별, 피로 수명 예측 등의 SHM 알고리즘을 네트워크상에서 구동하도록 개발하였고, 이는 센서 네트워크가 단순한 데이터 취득 이상의 기능을 할 수 있도록 만들 수 있다(Lynch et al., 2004; Zimmerman et al., 2008; Sim et al., 2009; Park et al., 2013; Sim et al., 2014).

무선 스마트 센서는 미래의 SHM 시스템으로 큰 잠재력을 갖고 있는 것으로 평가되고 있지만, 장기 모니터링 목적으로 사용될 경우 일부 센서가 고장 나거나 무선 통신이 불안정하여 센싱 데이터를 취득하지 못하는 경우가 발생한다. Rice et al.(2008)는 무선 스마트 센서 네트워크의 통신 시 데이터 손실에 대처할 수 있는 *ReliableComm* middleware 서비스를 개발하여 무선 통신이 불안정한 경우에도 모든 데이터를 받을 수 있도록 하였다. 그러나 무선 통신의 불안정한 정도가 심할 경우 전체 네트워크의 안정성을 위해 해당 센서 노드를 제외하게 되므로 해당 센서의 계측 데이터 전제가 소실된다.

<sup>1</sup>학생회원, 울산과학기술원(UNIST) 도시환경공학부 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 미국 일리노이 주립대학교 박사후연구원

<sup>3</sup>정회원, 울산과학기술원(UNIST) 도시환경공학부 부교수, 교신저자

\*Corresponding author: ssim@unist.ac.kr

Ulsan National Institute of Science and Technology(UNIST)

•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 무선 스마트 센서 네트워크에서 센서 노드가 일시적 또는 영구적으로 유실될 경우를 대처하기 위해 칼만 필터 기반의 데이터 복구 알고리즘을 수행하여 신뢰성을 향상시킨 무선 스마트 센서 네트워크를 제안한다. 칼만 필터는 다른 종류의 계측값을 융합하여 응답을 추정하는데 유용하여 널리 사용된다. 본 연구에서는 모델 기반 칼만 필터를 설계하고 무선 스마트 센서의 연산 기능을 활용하여 네트워크 내에서 계측된 가속도 데이터를 바탕으로 유실된 센서의 가속도 계측 데이터를 추정한다. 본 논문에서는 개발된 무선 스마트 센서 네트워크 시스템의 성능을 확인하기 위해 단순보구조에서 실험을 수행하여 추정된 가속도 응답과 계측값을 비교하였다.

## 2. 모델 기반 칼만 필터를 이용한 응답추정

본 연구에서는 미 계측 위치의 응답을 추정/복구하기 위해 모델 기반 칼만 필터를 이용한다. 구조물의 수치모델을 이용하여 칼만 필터를 구성하고, 계측된 구조물의 응답을 입력 값으로 사용하여 유실된 센서의 응답을 추정한다. 칼만 필터는 서로 다른 종류의 계측값을 동시에 사용하기 적합하여, 가속도, 변형률, 변위 등의 다물리량 데이터를 융합하여 구조물의 응답을 추정하는데 널리 사용되고 있다(Smyth and Wu, 2007; Papadimitriou et al., 2010; Jo, 2013; Jo and Spencer, 2014; Palanisamy et al., 2015). 미계측 위치에서의 응답을 추정하기 위한 모델 기반 칼만 필터의 설계를 간략히 기술하면 다음과 같다.

구조물의 상태 공간 표현식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Gw(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Hx(t) + Dw(t) + v(t) \quad (2)$$

$x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $w(t)$ ,  $v(t)$ 는 각각 시스템의 상태, 출력값, 입력 외란, 출력외란이며,  $A$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $D$ 는 상태방정식 표현을 위한 행렬이다.  $w(t)$ 와  $v(t)$ 는 비상관적(mutually uncorrelated) 정규분포를 따르며, 평균은 0, 공분산은 각각  $Q$ 와  $R$ 로 정의된다. 이때, 상태추정방정식은 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + K(z - H\hat{x}(t)) \quad (3)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (4)$$

$z(t)$ ,  $\hat{x}(t)$ ,  $\hat{y}(t)$ 는 각각 계측된 응답, 추정된 상태, 추정된 응답이고,  $C$ 는 응답추정을 위한 변환행렬,  $K$ 는 칼만 이득(Kalman gain)으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K = [PH^T + GQD^T][R + DQD^T]^{-1} \quad (5)$$

$P$ 는 상태오차의 공분산이며, 대수적 리카티 방정식(algebraic Riccati equation)의 해로 구할 수 있다.

무선 스마트 센서 네트워크에서 칼만필터 기반 응답추정을 수행하기 위해 상태방정식의 시스템 행렬이 필요하며 이는 구조물의 유한요소모델을 이용하거나 모든 센서로부터 얻은 계측데이터를 이용한 시스템 식별결과를 기반으로 구성할 수 있다. 센서 고장이나 불안정한 무선 통신 등으로 인해 특정 위치에서 계측이 불가능해질 경우, 미리 알려진 시스템 행렬로부터 그 위치의 응답에 해당하는 식 (4)의  $C$ 를 선택하여 원하는 응답을 추정할 수 있다. 이는 별도의 구조물 유한요소모델을 만들지 않으므로 적용이 간편하고 정확도가 높다. 구조물의 유한요소모델을 이용할 경우 미계측 센서 위치뿐만 아니라 임의의 위치에서 응답추정이 가능하지만, 실제 구조물과 유한요소모델의 차이에 따라 응답추정의 정확도에 영향을 받는다. 본 연구에서는 미계측 센서의 데이터 추정을 목적으로 하므로, 시스템 식별 결과에서 얻은 상태공간 방정식의 행렬을 사용한다.

## 3. 무선 스마트 센서 네트워크 소프트웨어 개발

### 3.1 Imote2 무선 스마트 센서 플랫폼 및 소프트웨어 개발 환경

본 연구에서는 MEMSIC사의 Imote2 센서 플랫폼(Fig. 1)을 기반으로 응답추정 알고리즘을 구현하였다. Imote2 무선 스마트 센서는 하드웨어에서 지원하는 고도의 연산능력을 갖고 있으며, Illinois SHM Project(ISHMP)에서 Imote2 구동 목적으로 제공되는 네트워크 기반 동기화 센싱, 무손실 무선 통신, 수치 해석 middle-ware 서비스 등을 이용할 수 있어 소프트웨어 개발에 소요되는 시간과 노력을 크게 줄일 수 있다(Rice et al., 2008; Sim and Spencer, 2009). 특히, 본 연구는 칼만 필터 기반 응답추정 알고리즘을 네트워크상에서 수행해야 하므로, Imote2의 연산 능력과 소프트웨어 개발 환경이 최적이라고 할 수 있다. Imote2의 하드웨어 특성은 Table 1에 정리된 바와 같다.

Imote2는 추가적인 배터리 보드와 센서 보드를 서로 겹치

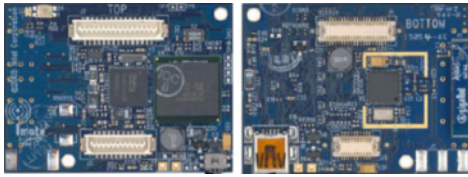


Fig. 1 Imote2 smart sensor platform(left: front, right: back)

Table 1 Imote2 hardware specification

Features	Values
Clock Speed	13~416 MHz
Active Power	44 mW@13 MHz, 570 mW@416 MHz
Flash Memory	32 MB
RAM	256 KB + 32 MB
Size	48 x 36 x 7 mm <sup>3</sup>

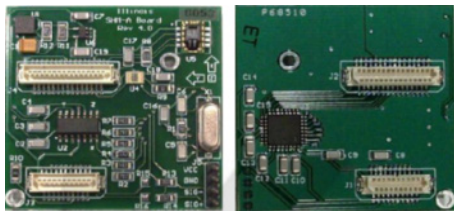


Fig. 2 ISM400 acceleration sensor board(left: front, right: back)

는 방식으로 사용하도록 만들어져 있다. 가속도 계측을 위해 Fig. 2의 ISM400보드를 사용하였다(Rice and Spencer, 2009). ISM400보드는 ST Microelectronic의 LIS344ALH 3축 가속도계를 이용하며, Quickfilter QF4A512로 구현된 4채널, 16비트 ADC와 샘플링 시간이 조정 가능한 시그널 컨디셔너를 갖고 있다.

ISHMP는 University of Illinois의 사회기반시설물 건전성 모니터링을 목적으로 하는 무선 스마트 센서의 하드웨어/소프트웨어를 개발하기 위한 프로젝트이다. ISHMP는 Imote2 기반의 ISHMP Service Toolsuite이라는 오픈소스 소프트웨어 패키지를 제공하며, 이 패키지는 센서 네트워크를 위한 소프트웨어 개발에 필수적인 소프트웨어 서비스를 포함하고 있다. 본 연구에 사용되는 서비스를 간단하게 정리하면 다음과 같다.

- **Unified sensing:** Imote2 센서 노드의 데이터 계측 및 계측된 데이터의 시간기록(time stamping)을 수행한다.
- **Time synchronization:** 각 센서 노드가 가진 시계(local clock)를 동기화하여 Unified sensing에서 기록하는 시간 정보가 동기화되도록 한다.
- **Reliable communication:** 센서 노드 간 무선 통신을 위한 서

비스로, 무선 통신 시 데이터 손실을 방지한다.

- **Remote command:** 센서 노드 간 체계적인 명령 전달과 수행을 지원한다.
- **Synchronized sensing:** 동일하게 데이터 계측 시작을 명령하여도 각 센서 노드는 미세하게 서로 다른 시각에 계측을 시작하게 되고, Synchronized sensing은 이를 보정하여 계측데이터가 동기화되도록 한다.
- **Math package:** 행렬연산, 푸리에 변환 등 데이터 처리에 사용되는 수학적함수를 제공한다.

이 소프트웨어 서비스는 센싱과 무선 통신에 사용되는 것이므로, SHM 관련 센서 네트워크 어플리케이션에 공통적으로 사용될 수 있어 효율적인 소프트웨어 개발이 가능하다.

### 3.2 센서 네트워크 어플리케이션 개발

본 연구에서는 ISHMP Services Toolsuite에서 제공하는 서비스를 이용하여 미 계측 위치의 응답을 추정하는 무선 스마트 센서 네트워크 어플리케이션을 개발하였다. 이 어플리케이션은 무선 스마트 센서 네트워크에서 각 센서 노드가 가속도 데이터를 계측하고, 센서 노드 유실 시 유실된 노드의 가속도 데이터를 추정하는 기능을 수행한다. Toolsuite에서 제공하는 시간동기화 및 데이터 계측 등의 소프트웨어 서비스를 조합하여, 네트워크를 구성하는 센서 노드 등의 각 요소들이 각각의 기능을 수행하고 데이터 추정을 수행할 수 있도록 어플리케이션을 구성하였다.

무선 스마트 센서 네트워크는 네트워크 제어를 위한 베이스 스테이션(base station)과 게이트웨이 노드(gateway node), 센싱 및 데이터 처리를 위한 다수의 센서 노드로 구성된다(Fig. 3). 게이트웨이 노드로부터 센싱 시작 명령이 전체 네트워크로 전달되면 각 센서 노드는 내장 시계(local clock)를 동

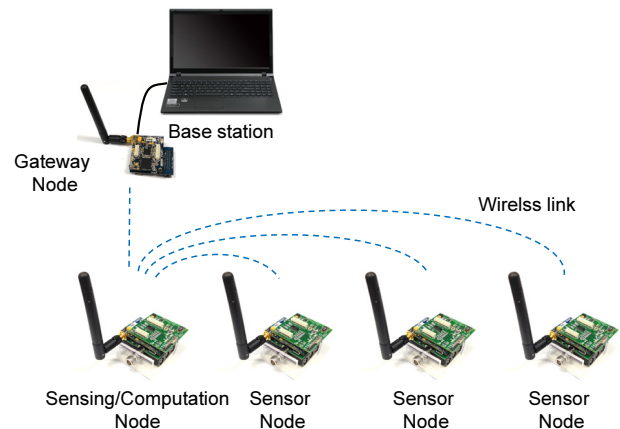


Fig. 3 Network configuration

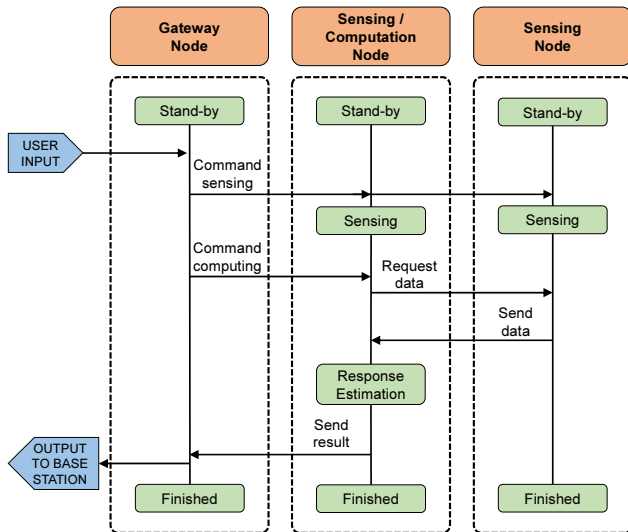


Fig. 4 Flowchart of the response estimation software

기화한 후 데이터 계측을 시작한다. 사용자에게 의해 정해진 시간만큼의 가속도 계측이 끝나고 나면, 계측 데이터의 시간 기록을 이용하여 각 센서 노드에서 동기화된 가속도 데이터를 계산한다. 네트워크상에서 유실된 센서 노드가 있을 경우, 해당 센서 노드의 미세측 데이터를 추정하기 위해 게이트웨이 노드는 칼만 필터에 관한 정보(시스템 행렬 및 공분산)를 계산을 수행하는 노드(Sensing / Computation Node)로 전송하며 데이터 추정을 수행하도록 명령한다. 이 노드는 동기화된 가속도 데이터를 각 센서 노드로부터 전송받아 미세측 데이터의 추정에 사용된다. 이 과정에서 앞서 설명한 모델 기반 칼만 필터를 구현한 소프트웨어 서비스를 통해 미세측 데이터가 추정된다. 어플리케이션의 단계 별 진행내용을 요약하면 Fig. 4와 같다.

본 연구에서 개발된 어플리케이션은 모든 계측 데이터를 중앙컴퓨터로 가져오는 방식의 데이터 계측(DAQ) 시스템에 적합한 것은 아니며, 피로추정 등과 같이 추정된 응답을 네트워크상의 다른 데이터 처리에 이용하는 경우에 유용하다. 무선 스마트 센서 네트워크에서는 배터리 사용 및 무선 통신 시의 불안정성을 최소화하기 위해 무선 통신의 양을 줄이는 것이 바람직하므로, 전통적인 유선 기반의 센싱 시스템에서 사용되는 중앙집중식 데이터 취득은 지양되고 있다. 따라서 본 연구의 어플리케이션도 네트워크상의 데이터 처리를 통해 미세측 응답을 추정하고 이를 손상 추정, 시스템 식별, 피로 추정 등의 추가적인 SHM 알고리즘에 이용하는 것을 목적으로 한다.

## 4. 실험 검증

### 4.1 실험 셋업

개발된 무선 스마트 센서 네트워크 어플리케이션의 성능을 확인하기 위해 Fig. 5의 단순보 구조물을 이용하여 실내 실험을 수행하였다. 단순보는 길이 2 m, 폭 80 mm, 두께 10 mm의 강재로 이루어져 있으며, 지점부 A의 200 mm 거리에서 200 mm 길이만큼은 두께가 5 mm로 감소되어 구조물 비대칭성을 갖는다. 구조물의 B지점(A지점으로부터 300 mm) 또는 C지점(D지점으로부터 300 mm)에 충격 하중을 가하고, 등간격으로 설치된 총 4개의 Imote2 센서 노드(Fig. 5)가 구조물의 가속도 응답을 계측하였다. 샘플링은 280 Hz로 하였으며, 이 때 ISM400 센서 보드의 차단주파수(cutoff frequency)는 70 Hz이다. B지점에 충격 하중을 가했을 때 각 센서 노드의 가속도 응답을 이용하여 주파수 응답 함수를 계산하면 Fig. 6과 같으며, 차단주파수 이내에 세 개의 고유모드가 존재하는 것을 알 수 있다.

실험에 사용한 무선 스마트 센서 네트워크는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 베이스스테이션 컴퓨터, 게이트웨이 노드, 다수의 센서 노드로 이루어진다. 베이스 스테이션은 사용자의 입력을 받아들여 게이트웨이 노드로 명령을 전송하여 센서 노드가 동작하게 만들며, 센서 네트워크에서 발생하는 계측 데이터 또는 데이터 처리의 결과물을 저장하는 역할을 한다. 게이트웨이 노드는 사용자 입력에 따라 센서 네트워크를 제어

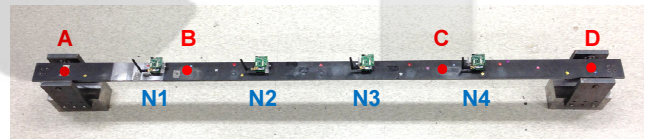


Fig. 5 Simply supported beam and location of sensors(N2 is assumed to be a malfunctioning node)

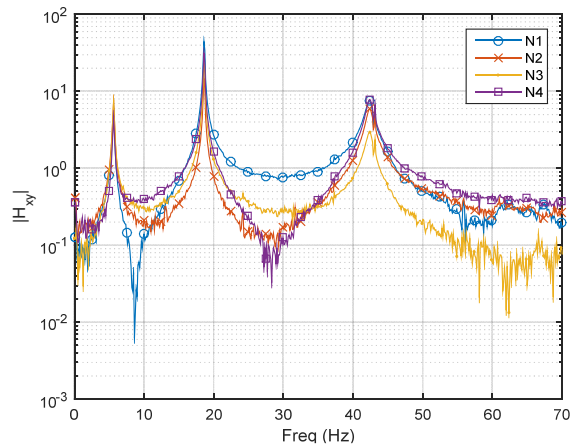


Fig. 6 Magnitude of the estimated frequency response function

```

/opt/shm/tools/DecentralizedResponseEstimation
handpat /opt/shm/tools/DecentralizedResponseEstimation
$ autocomm -d COM6
BluShb-
BluShb-SetDRESensorTopology 151 105 80 32
BluShb-SetDREParameters 3000 280 3 1 1
BluShb-StartDRE
- sensor topology:
- local community 1: 151 105 80 32
BluShb-
- starting time synchronization, wait 30 seconds...
- Finished Time Sync.
- starting data acquisition in 36 seconds...
- sensing parameters sent to cluster head(s) 151
- sensing started, Waiting 13 seconds...
- sensing finished
- sensing in remote nodes finished
- requesting data for node 151...received
- printing data finished, (3000 lines)
- requesting data for node 105...received
- printing data finished, (3000 lines)
- requesting data for node 80...received
- printing data finished, (3000 lines)
- requesting data for node 32...received
- printing data finished, (3000 lines)
- Finished collecting sensor data
- local data processing started at cluster head 151...
- local data processing finished at cluster head 151
- local data processing finished
- requesting processed data for cluster head 151...received
- finished printing data, (3000 lines)
- finished collecting processed data
- DecentralizedDataProcessing finished
BluShb-
BluShb-Illinois SHM Toolsuite version 3.1.0 (Rev. 1847)
Release date 2012/05/24
BluShb-SV enabled.
Charger Voltage is 0.000V...charger not enabled
Disabling Charger...Battery Voltage is 4.306V
BluShb-Device Removed;

```

Fig. 7 Execution of the developed sensor network application

하여, 사용자와 네트워크 사이의 인터페이스 역할을 한다. 본 연구에서 개발한 어플리케이션은 시리얼 통신을 통해 베이스 스테이션과 게이트웨이 노드 사이의 명령 전달 및 데이터 전송을 수행하며, 실행화면은 Fig. 7과 같다. 게이트웨이 노드는 응답추정에 사용되는 구조물의 시스템 정보를 가지고 있으며, 계산을 수행하는 센서 노드에 무선으로 전송한다. 각각의 센서 노드는 공통적으로 구조물의 가속도 응답을 계속하며, 이 중 하나의 대표 센서 노드는 다른 센서 노드로부터 계속 데이터를 전송받아 미계측 위치의 응답을 추정한다.

게이트웨이 노드에서 대표 센서 노드로 전송하는 구조물 시스템 정보는 모든 센서 노드가 동작할 때 계속한 데이터를 이용한 시스템 식별 결과로부터 결정하였다. 앞서 설명한 바와 같이 구조물의 유한요소모델을 사용할 수 있으나, 본 연구의 목적은 미계측 센서 위치의 응답추정이므로, 시스템 식별 결과로부터 간단히 구조물의 시스템 정보를 결정할 수 있다.

#### 4.2 미계측 응답 데이터 추정 과정 및 실험 결과

본 실험에서는 2번 센서 노드(N2)가 유실된 것으로 가정하였으며, 가속도 응답 계속만 수행하여 계속데이터를 베이스 스테이션에 전송하고, 전송 후에는 전원을 차단하여 응답추정에는 참여하지 않도록 하였다. 따라서, 1, 3, 4번 센서 노드에서 계속된 데이터를 이용하여 1번 센서 노드에서 응답을 추정하는 계산을 수행하였다. 대표 센서 노드인 1번 센서 노드는 시스템 식별 결과로부터 얻어진 시스템 행렬 C에서, 응답하지 않는 N2 위치에 해당하는 부분을 추출하여 칼만 필터를

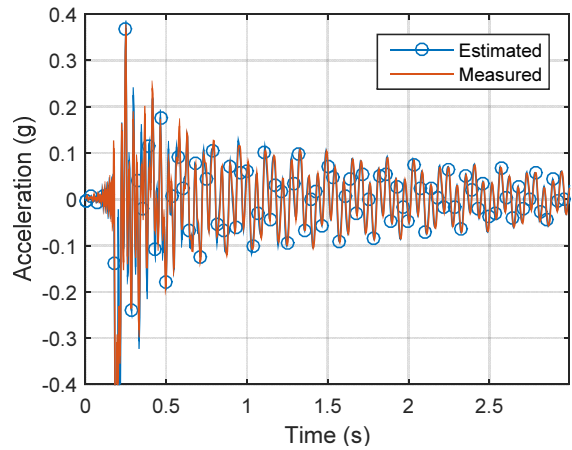


Fig. 8 Comparison of the measured and the estimated responses: impact at B

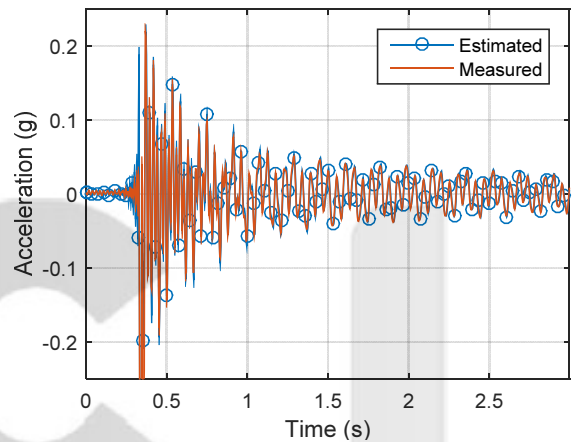


Fig. 9 Comparison of the measured and the estimated responses: impact at C

구성하였다.

B와 C지점에 각각 충격 하중을 가했을 때, 유실된 2번 노드의 가속도 계속 데이터와 추정 데이터를 비교하면 Figs. 8, 9와 같다. 충격 하중 직후보다는 자유진동을 하는 경우 정확도가 더 높은 것으로 관찰되는데, 이는 칼만 필터를 구성하는 구조물 시스템 정보가 3개의 고유모드만을 이용하여 만들어졌으므로 충격 시의 급격한 변화를 따라가기 어렵기 때문이다. 상시 진동을 계속하고 추정하는 경우 정확도가 더 높다고 예측할 수 있다. 자유진동의 경우 1~3초 사이에서 계속 및 추정 가속도 데이터의 진폭(peak-to-peak) 차이를 계산하면 B, C점 충격 시 각각 평균 1.30%, 2.98%로 추정이 비교적 정확하게 이루어졌음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 미계측 위치의 응답을 추정하는 무선 스마트 센서 네트워크 어플리케이션이 설계된 대로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 토목 구조물 모니터링 목적의 무선 스마트 센서 네트워크에서 센서 유실에 대처하기 위한 임베디드 응답추정 기법을 제안하였다. 유실된 센서의 위치에서 구조물의 응답을 복구하기 위해, 칼만 필터 기반의 응답추정 알고리즘을 구현하는 무선 스마트 센서 네트워크 어플리케이션을 개발하였다. 소프트웨어 개발에는 미국 일리노이 대학교에서 제공하는 오픈소스 ISHMP Services Toolsuite을 이용하였으며, 하드웨어는 Imote2 스마트 센서 플랫폼으로 선정하였다. 사용자 입력에 의해 센서 네트워크가 구동되면, 각 센서 노드는 가속도 응답을 계측하고 이후 게이트웨이 노드에 저장된 구조물의 시스템 정보와 각 센서 노드에서 계측된 가속도 데이터가 응답추정 계산을 수행하는 센서 노드로 전송되며, 이를 바탕으로 미계측 센서 위치에서의 데이터를 추정한다. 응답추정에 필요한 구조물 시스템 정보는 구조물의 유한요소모델을 사용하거나, 기 계측된 데이터를 이용한 시스템 식별 결과를 이용하여 결정할 수 있다.

개발된 무선 스마트 센서 네트워크 어플리케이션의 성능을 검증하기 위해 단순보에 설치된 소규모 센서 네트워크를 이용한 실내실험을 수행하였다. 개발된 어플리케이션이 설치된 무선 스마트 센서 네트워크를 이용하여 충격 하중 시 가속도를 계측하고, 미계측 위치의 가속도 응답을 추정하였다. 4개의 Imote2 센서 노드 중 하나의 센서를 가속도 응답 계측 후 전원을 차단하여 센서 유실을 모사하였으며, 계측된 응답은 베이스 스테이션으로 전송하여 추정 응답과 비교하는데 사용하였다. 추정된 응답은 계측값과 비교하여 충분히 정확하게 얻어진 것으로 관찰되었다. 본 연구에서 개발된 무선 스마트 센서 네트워크의 응답추정기법은 센서 유실이 일어나게 되는 장기 모니터링 목적의 시스템에 유용하게 사용될 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술 연구사업의 연구비지원(15SCIP-B065985-03)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Jo, H. (2013), Multi-scale Structural Health Monitoring Using Wireless Smart Sensors, PhD dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.

2. Jo, H., and Spencer, B. F. (2014), Multi-Metric Model used Structure Health Monitoring, *Proceedings of SPIE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014*, San Diego, 90611F-90611F.
3. Lynch, J.P., Sundararajan, A., Law, K.H., Kiremidjian, A.S. and Carryer, E. (2004), Embedding Damage Detection Algorithms in a Wireless Sensing Unit for Operational Power Efficiency, *Smart Materials and Structures*, 13(4), 800-810.
4. Palanisamy, R.P., Cho, S., Kim, H., and Sim, S.-H. (2015), Experimental Validation of Kalman Filter-based Strain Estimation in Structures Subjected to Non-zero Mean Input, *Smart Structures and Systems*, 15(2), 489-503.
5. Papadimitriou, C., Fritzen, C.P., Kraemer, P. and Ntotsios, E. (2010), Fatigue Predictions in Entire body of Metallic Structures from a Limited Number of Vibration Sensors Using Kalman Filtering, *Structural Control Health Monitoring*, 18(5), 554-573.
6. Park, J.-W., Sim, S.-H., and Jung, H.J. (2013), Wireless Sensor Network for Decentralized Damage Detection of Building Structures, *Smart Structures and Systems*, 12(3-4).
7. Rice, J. A., and Spencer Jr, B. F. (2009), Flexible Smart Sensor Framework for Autonomous Full-scale Structural Health Monitoring, Newmark Structural Engineering Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign.
8. Rice, J. A., Mechitov, K. A., Spencer Jr, B. F., and Agha, G. (2008), A Service-oriented Architecture for Structural Health Monitoring Using Smart Sensors, *In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing.
9. Sim, S.-H. and Spencer, Jr., B.F. (2009), Decentralized Strategies for Monitoring Structures using Wireless Smart Sensor Networks. Newmark Structural Laboratory Report Series, University of Illinois at Urbana-Champaign, Report 19.
10. Sim, S.-H., Li, J., Jo, H., Park, J.-W., Cho, S., Spencer, Jr., B.F., and Jung, H.-J. (2014), A Wireless Smart Sensor Network for Automated Monitoring of Cable Tension, *Smart Materials and Structures*, 23(2), 025006.
11. Sim, S.-H., Spencer, Jr., B. F., Zhang, M., and Xie, H. (2009), Automated Decentralized Modal Analysis using Smart Sensors, *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, 17(8), 872-894.
12. Smyth, A., and Wu, M. (2007), Multi-rate Kalman Filtering for the Data Fusion of Displacement and Acceleration Response Measurements in Dynamic System Monitoring, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(2), 706-723.
13. Spencer, B. F., Ruiz-Sandoval, M. E., and Kurata, N. (2004), Smart Sensing Technology: Opportunities and Challenges, *Structural Control and Health Monitoring*, 11(4), 349-368.
14. Straser, E.G. and Kiremidjian, A.S. (1998), A Modular, Wireless Damage Monitoring System for Structures, Report No. 128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA.
15. Zimmerman, A. T., Shiraishi, M., Swartz, R. A., and Lynch, J. P. (2008), Automated Modal Parameter Estimation by Parallel Processing within Wireless Monitoring Dystems, *Journal of Infrastructure Systems*, 14(1), 102-113.

# KCS I

---

**요 지** : 사회기반시설물의 안전성을 효과적으로 평가하고 모니터링하기 위해 무선 스마트 센서가 개발되어 전 세계적으로 연구가 진행되고 있다. 무선 스마트 센서는 통상 계측 및 임베디드 데이터 연산, 무선 통신이 가능한 공통점을 갖고 있어 기존의 유선 기반 센서가 가진 단점을 극복할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 구조물의 장기 모니터링의 경우 내구성이 충분하지 못해 발생하는 센서 고장이나, 환경적 이유로 인한 무선 통신이 불안정할 경우 계측 데이터를 가져올 수 없는 문제가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 무선 스마트 센서 기반의 네트워크에서 이와 같은 문제로 센서 노드에 무선 통신으로 접근할 수 없는 경우를 대처하기 위해, 칼만 필터 기반의 데이터 복구를 수행하여 무선 스마트 센서 네트워크의 신뢰성을 향상시키는 기법을 제안한다. 본 논문에서는 무선 스마트 센서의 연산 기능을 활용하여 네트워크 내에서 계측된 가속도 데이터를 바탕으로 유실된 센서의 가속도 계측 데이터를 추정한다. 개발된 무선 스마트 센서 네트워크 시스템의 성능을 확인하기 위해 단순보 구조에서 실험을 수행하여 추정된 가속도 응답과 계측 값을 비교하였다.

**핵심용어** : 데이터 복구, 칼만 필터, 무선 스마트 센서, 무선 스마트 센서 네트워크

---