

사장교 구조 건전성 모니터링을 위한 스마트 무선 센서 시스템

Wireless Smart Sensor System for Structural Health Monitoring of Cable-stayed Bridges

박종웅* · 조수진** · 정형조*** · 윤정방**** · 서주원*****

Park, Jong-Woong · Cho, Soo-Jin · Jung, Hyung-Jo · Yun, Chung-Bang · Seo, Ju-Won

요약

최근 건설 기술의 비약적인 발전으로, 국내외적으로 장대교량의 건설이 증가하고 있다. 이러한 장대교량들은 지속적인 안전성 관리가 필요하며 현재 국내 다수의 장대교량들에는 다양한 센서로 이루어진 구조 건전성 모니터링 시스템이 설치, 운용되고 있다. 장대교량과 같은 대형 구조물의 물리적 상태를 정확하게 파악하기 위해서는 다수의 센서배치가 필요로 하지만, 이는 센서 자체의 비용뿐만 아니라 센서와 데이터 서버를 연결하는 케이블의 설치비용으로 인하여 상당히 제약을 받을 수 밖에 없다. 실제로 홍콩의 Tsing Ma 대교의 경우 350개의 센서를 설치하는데 약 8 백만원이 넘는 금액이 들었으며(Farrar 등, 2004), Celeby(2002)의 보고에 의하면 각 센서의 채널 당 케이블의 설치비용으로 약 5000불의 비용이 소모되고 있다. 본 연구에서는 이러한 센서와 이러한 불편함을 극복하기 위하여 자체 연산기능을 가지고 있는 스마트 무선 센서를 개발하고, 이를 해남과 진도를 잇는 연육교인 제 2 진도대교에 적용, 사장교의 구조 건전성을 저비용 및 높은 편의성으로 모니터링 하기 위한 테스트베드를 구축하였다

keywords : 스마트 센서, 구조물 안전성 모니터링, 진도대교

1. 서론

최근 건설 기술의 비약적인 발전으로, 국내외적으로 장대교량의 건설이 증가하고 있다. 이러한 장대교량들은 지속적인 안전성 관리가 필요하며 현재 국내 다수의 장대교량들에는 다양한 센서로 이루어진 구조 건전성 모니터링 시스템이 설치, 운용되고 있다. 장대교량과 같은 대형 구조물의 물리적 상태를 정확하게 파악하기 위해서는 다수의 센서배치가 필요로 하지만, 이는 센서 자체의 비용뿐만 아니라 센서와 데이터 서버를 연결하는 케이블의 설치비용으로 인하여 상당히 제한적일 수 밖에 없다. 실제로 홍콩의 Tsing Ma 대교의 경우 350개의 센서를 설치하는데 약 8백만원이 넘는 금액이 들었으며(Celebi, 2002)의 보고에 의하면 각 센서의 채널 당 케이블의 설치비용으로 약 5000불의 비용이 소모되고 있다. 본 연구에서는 이러한 센서와 이러한 불

* 학생회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 jwp@kaist.ac.kr

** 학생회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 zelos@kaist.ac.kr

*** 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수 hjung@kaist.ac.kr

**** 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 정교수 ycb@kaist.ac.kr

***** 현대건설기술연구소 초장대교량팀 팀장 jwseo@hdec.co.kr

편함을 극복하기 위하여 자체 연산기능을 가지고 있는 스마트 무선 센서를 개발하고, 이를 해남과 진도를 잇는 연육교인 제 2 진도대교(그림1)에 적용, 사장교의 구조 건전성을 저비용 및 높은 편의성으로 모니터링 하기 위한 테스트베드를 구축하였다.



그림 1 진도대교의 전경 (조수진 등, 2009)

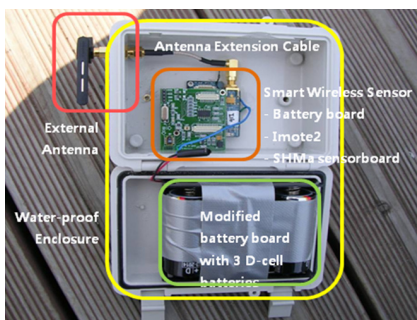
표 1 진도대교 교량 정보 (조수진 등, 2009)

대상 교량	제 2 진도대교
형식	강사장교
총 경간	총 484m (70m+344m+70m)
제한속도	70km/hr
관리자	익산지방국토관리청

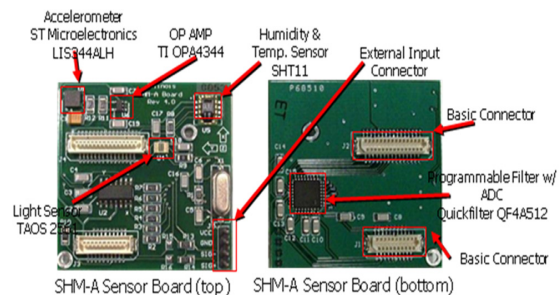
2. 스마트 무선 센서 (Wireless Smart Sensor)

2.1 하드웨어(Hardware)

본 연구에서 활용된 센서 패키지는 총 3가지로 구성된다: (1) 데이터를 내부적으로 저장하고 이를 연산하여 무선으로 송수신할 수 있는 스마트 무선 센서, Imote2, (2) 미국 UIUC에서 개발한 계측용 센서 보드 (SHM-A Board), (3) 전원을 공급하기 위한 Battery Board. SHM-A 보드(Rice et al., 2008)는 3축 가속도와 온도, 습도를 계측할 수 있으며 현장에 사용될 때는 풍속 측정을 위한 보드, 높은 정확도를 가지는 가속도계 보드 등 다양한 종류의 보드가 추가 되었다. 그리고 동적 계측 시 발생하는 Aliasing을 제거하기 위하여, 샘플링 주파수에 맞추어 cut-off frequency가 변환되는 programmable anti-aliasing (AA) filter 또한 SHM-A 보드에 내장하였다. 개발된 스마트 무선 센서는 실제 교량에의 적용을 위하여 그림 2와 같은 방수 케이스 내부에 조립되어 진도대교에 설치되었다.



(a) 스마트 무선 센서 패키지



(b) 현장에 사용된 센서 (SHM-A Board)

그림 2 스마트 무선 센서 (조수진 등, 2009)

2.2 소프트웨어(Software)

소프트웨어는 TinyOS를 기반으로 제작되었으며, 각 필요한 요소를 모듈화 하여 사용하기 편리하게 구성하여 UT다. 소프트웨어는 SHM-A 보드 제어를 위한 Driver와 무선 통신 프로토콜, 시간 동기화 기술, 기본

데이터 계측과 같은 기본 소프트웨어와 Multi-hop 통신 프로토콜, 분산 데이터 처리 기술과 같은 무선 센서 네트워크 활용 소프트웨어, 구조 건전성 모니터링을 위한 다양한 알고리즘 모듈, 그리고 센서의 성능 테스트를 위한 유틸리티들로 구성되어 있다. 현장에 장기간 모니터링을 하기 위해 특별히 제작된 요소는 Snoozealarm, Sentry, Automonitor가 있다. Snoozealarm이란 센서의 효율적인 배터리 관리를 위하여, 모든 센서들은 정상시에는 Sleep 상태를 유지하며 지속적으로 깨어 있는 몇 개의 과수꾼(Sentry) 센서가 임계치를 넘어서는 가속도나 바람의 속도를 계측하였을 시 Sleep중인 센서들을 트리거링(Triggering)시켜 계측을 수행하며 이것을 총체적으로 담당하는 프로그램을 Auto-monitor라고 한다. 개발된 소프트웨어는 UIUC의 관련 홈페이지(<http://shm.cs.uiuc.edu>)에서 누구나 다운 받아서 활용 할 수 있으며, 자세한 내용은 위 홈페이지를 참조하기 바란다.

3. 사장교 건전성 모니터링 테스트베드 구축

지난 2009년 6월, 총 70개 (거더: 48개, 케이블: 16개, 주탑: 6개) 의 스마트 무선 센서가 제 2 진도대교에 설치되었다. 우선 기본적인 계측 성능을 검증하기 위하여 70개의 센서는 2개의 독립적인 센서 네트워크(해남 방향: 37개, 진도방향: 33개)로 구성되었으며, 각각의 센서 네트워크는 제 1 진도대교의 해남 쪽과 진도 쪽의 주탑에 설치된 베이스 스테이션에 의하여 각각 제어 및 관리된다. 베이스 스테이션의 PC에는 유선인터넷이 설치되어 FTP와 VNC(Virtual Network Connection)를 통하여 원격으로 시스템 관리 및 데이터의 관리/전송이 수행된다. 접근이 어려운 주탑 위의 센서는 무선 센서의 한계인 배터리문제의 극복을 위하여 태양광 패널을 연결하였다. 그림3은 베이스 스테이션에서 수집한 케이블, 주탑, 교량의 진동 데이터를 나타낸다.

위의 70개 센서로부터 들어온 데이터를 받아서 제 2 진도대교의 모드해석을 수행하였으며, 그 중 진도방향 시스템으로부터 얻은 결과를 아래 그림 4에 나타내었다.

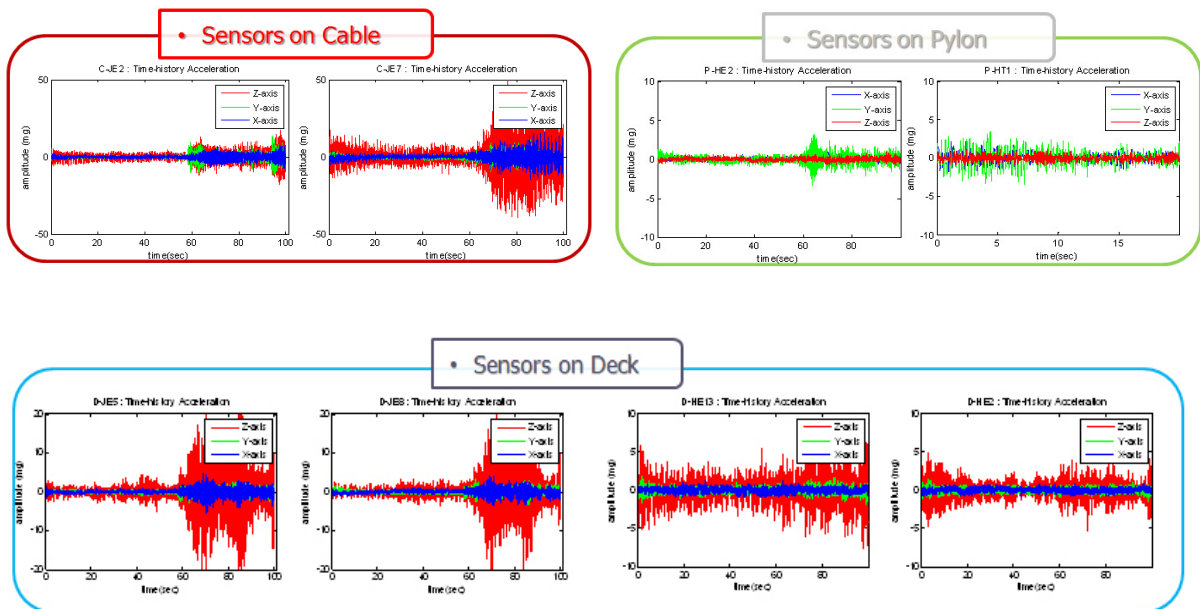


그림3 수집된 진동 데이터 (S Cho, et al, 2010)

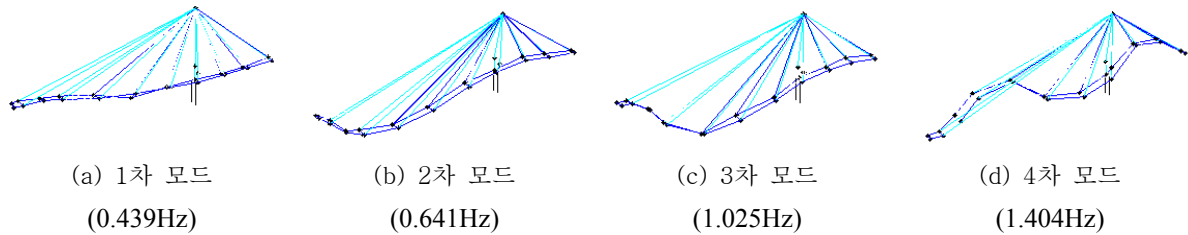


그림4 모드 해석 결과 (조수진 등, 2009)

3. 결론

본 연구에서는 스마트 무선 센서를 활용하여 제 2 진도대교에 건전성 모니터링을 위한 테스트베드를 구축하였다. 이를 위해서 장대교량의 건전성 모니터링에 효과적인 센서 보드를 개발하였으며, 이를 Imote2에 접목하여 무선센서 네트워크를 구축하기 위한 효율적인 소프트웨어를 구성하였다. 개발된 하드웨어와 소프트웨어를 활용하여 제2진도대교를 테스트베드로 총 70개의 센서를 배치하였으며, 데이터 수집부에 인터넷접속이 가능하도록 설치하여 원격으로 데이터를 전송받는 시스템을 구축하였다. 마지막으로 계측한 데이터를 바탕으로 효과적으로 모드 해석을 수행하였으며, 그 결과 본 시스템이 매우 효과적임을 입증하였으며, 이를 바탕으로 본 테스트베드의 건전성을 지속적으로 모니터링 할 수 있는 기반을 마련하였다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원(과제번호 NRF-2008-220-D00117)으로 수행되었으며, 연구에 도움을 주신 한국연구재단, 국토해양부, 현대건설기술연구소 그리고 진도대교 유지관리사무소 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

- Celebi, M. (2002). Seismic Instrumentation of Buildings (with Emphasis of Federal Buildings). Technical Report No. 0-7460-68170, United States Geological Survey, Menlo Park, CA, USA.
- S Cho, H Jo, S Jang, J Park, H.J Jung, C.B Yun, B.F Spencer,Jr and J Seo (2010). Structural Health Monitoring of a Cable-stayed Bridge Using Smart Sensor Technology: Data Analyses, Smart Structures and Systems, Accepted
- 조수진, 정형조, 윤정방 (2009). 스마트 무선 센서를 이용한 사장교 구조 건전성 모니터링 테스트베드, 2009 대한토목학회 정기학술대회
- ISHMP homepage : <http://shm.cs.uiuc.edu>