

# 무선센서 네트워크 기반 교량의 건전성 모니터링 기술

Structural Health Monitoring of Bridges Using Wireless Smart Sensor Networks

심성한 Sung-Han Sim  
울산과학기술대학교 도시환경공학부 조교수

## 1. 머리말

최근 증가하고 있는 재난재해에 대한 사회적 관심과 더불어 재난 대응에 대한 필요성이 커지면서 정부 및 여러 연구기관에서 우리 사회의 재난에 대한 회복성을 증대시키기 위한 다양한 노력을 하고 있다. 국가의 주요 사회기반 시설물의 건전성을 모니터링(structural health monitoring; 이하 SHM)하여 구조적 이상 상태를 조기에 검진하고 대처하는 것이 재난대응을 위한 노력에 필수적인 요소로 인식되고 있다. 또한 SHM 기술은 재난 시 시설물의 구조적 상태를 실시간으로 파악하여 개별 시설물뿐만 아니라 시설물의 네트워크의 긴급 및 장기적인 복구 계획을 수립하는 데에도 중요한 정보를 제공할 수 있다. 이처럼 SHM 기술은 사회기반 시설물의 안전성과 수명을 연장하는 것과 더불어 재난에 대한 사회의 전체적인 회복성을 향상시키는데 기여할 수 있다.

현재까지 전 세계적으로 장대교량에 주로 SHM 시스템이 설치되었는데, 막대한 설치 및 유지비용으로 인해 보편적으로 사용되지 못하고 있다. 예를 들어 미국 미주리주에 위치한 Bill Emerson Memorial Bridge에 설치

된 SHM 시스템은 약 130만 달러의 설치비용이 소모되었다. 중국의 주요 장대교량에 설치된 SHM 시스템도 <표 1>과 같이 대부분 센서 채널수에 비해 비용이 상당하다. 이렇게 비용적인 측면에서 효율적이지 못한 것은 센서 자체의 높은 가격과 각 센서를 중앙 데이터 수집 장치로 연결하기 위한 케이블 설치에서 발생하는 비용 증가가 가장 큰 원인이다.

## 2. 무선스마트 센서(Wireless Smart Sensor)

무선통신 기반의 스마트 센서는 기존의 유선센서로 이루어진 SHM 시스템이 가지는 많은 문제점을 해결하기 위해 도입되었으며, 그 가능성을 현실로 이루기 위해 많은 연구가 진행 중이다. 스마트 센서는 일반적으로 자체 연산능력 및 데이터 측정, 무선통신기능, 저비용, 배터리에 의한 전원공급 등의 공통적인 특성을 가진다. 10여 년 전 스마트 센서가 처음 SHM 목적으로 도입된 후 스마트 센서 기술 연구에 많은 진보를 이루었으나 현재까지는 실제 구조물의 SHM 목적으로 대규모 무선센서 네트워크를 적용한 사례는 많지 않다. 미국 일리노이 주립

표 1. 주요 SHM 시스템의 비용

교량	총 비용(\$)	채널 수	채널 당 비용(\$)
Bill Emerson Memorial Bridge	130만	86	15,000
Tsing Ma Bridge	770만	300	25,000
Sutong Bridge	370만	600	6,200
Stonecutters Bridge	1290만	1200	10,750

대학교(University of Illinois at Urbana-Champaign)에서는 무선센서 네트워크를 실구조물의 장기 모니터링에 적용하기 위해 해결해야 하는 다양한 문제에 대해 스마트 센서의 하드웨어/소프트웨어적인 측면에서 연구하고 있다. 이 연구에서 특히 주목할 만한 것은 대형 토목구조물의 모니터링에 필수적인 네트워크의 확장성(scalability)을 높였다는 점이다. 작은 규모의 네트워크가 실험실 환경에서 성공적으로 작동한다 하더라도 확장성을 고려하지 않고 디자인했다면 대규모 네트워크로 확장했을 때 예상치 못한 문제가 발생할 수 있다. 2008년 UC버클리 대학 연구진이 금문교에 설치한 무선센서 네트워크의 경우 80초(샘플주파수는 1,000 Hz)의 데이터를 중앙컴퓨터로 가져오는데 10시간이 소모되었다는<sup>1)</sup> 사실은 확장성의 중요성에 대해 시사하는 바가 크다.

### 3. 제2진도대교 무선센서 네트워크

일리노이 대학교, 카이스트, 동경대학교로 이루어진 국제공동연구팀은 개발된 무선센서 네트워크를 제2진도대교에 설치하여 실제 구조물 모니터링을 위한 타당성을 검증하고 있다(사진 1). 진도대교는 전라남도 해남과 진도를 잇는 사장교이며, 제1,2진도대교는 각각 1984년, 2005년에 개통하였다. 공동연구팀은 2009년 70개의 스마트 센서(총 427 채널)와 두 개의 중앙컴퓨터로 이루어진 무선센서 네트워크를 설치하였다. 각 센서노드의 구성은 ① 미국 MEMSIC사의 Imot2 스마트 센서와, ② 3축 가속도, 온도, 습도, 빛을 측정할 수 있는 ISM400 센서보드(사진 2), ③ 배터리 및 배터리보드로 이루어지며, 교량의 주탑, 케이블, 상판하부에 무선센서 네트워크를 설치하였다. 설치된 센서로부터 상



사진 2. ISM400 센서보드를 탑재한 Imote2 스마트 센서 플랫폼

시진동을 측정하고, 무선통신을 통해 중앙컴퓨터로 데이터를 전송하여 성공적으로 교량의 동적특성을 파악할 수 있었으나 동시에 무선센서 네트워크의 실제 적용을 위해 반드시 풀어야 할 문제점인 자가발전 및 효율적인 전력소비관리, 네트워크 운영체제 안정화, 무선통신 신뢰성 향상 등이 대두되었다.

이듬해 2010년 여름, 공동연구팀은 2009년 실험에서 얻은 경험을 바탕으로 무선센서 네트워크를 보완하여 제2진도대교에 다시 설치하였다(그림 1). 스마트 센서의 수를 113개, 678채널로 확장하고, 장기 모니터링에 필요한 전원공급을 위해 모든 센서에 태양광 발전판을 부착

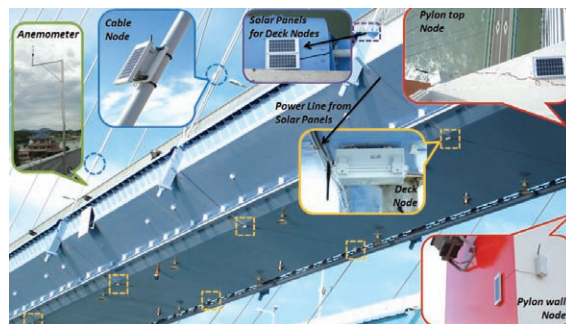


그림 1. 2010-2011년 무선센서 네트워크 설치 모습



사진 1. 제2진도대교(무선센서 네트워크는 진도대교 좌측에 설치됨)

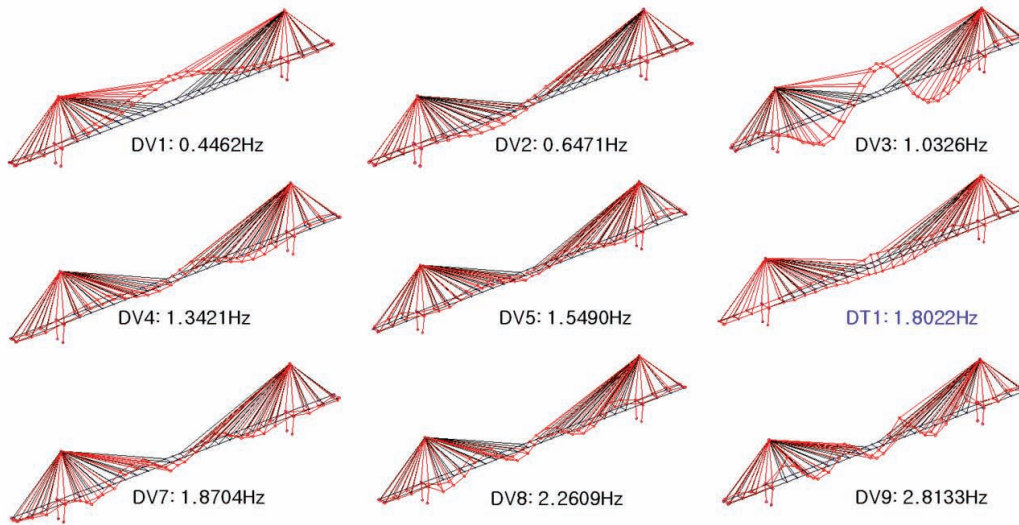


그림 2. 주요 고유모드(DV1~5: 휨 모드, DT1: 비틀림 모드)

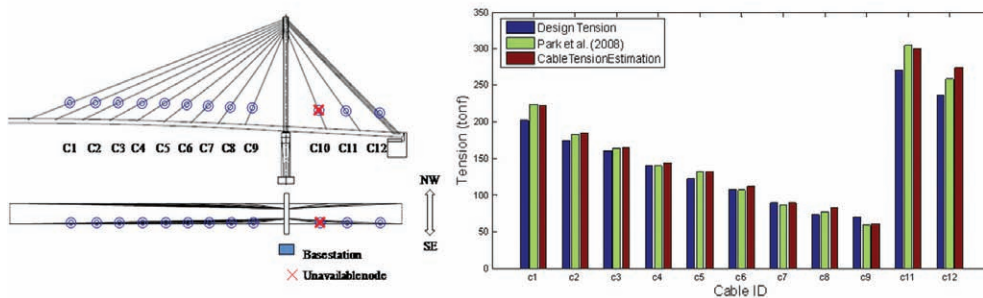


그림 3. 케이블의 장력 추정

하였다. 그리고 무선센서 네트워크의 무선 데이터 통신을 최소화하고 전력소모를 줄이기 위해 네트워크상의 분산형연산 알고리즘을 구현하여 교량의 동적특성 파악 <그림 2> 및 케이블 장력추정에 이용하였다<그림 3>. 장기 모니터링을 위해 디자인된 운영체제도 진도대교 무선센서 네트워크의 주요 특징 중 하나이다. 운영체제는 자동화된 지능형 네트워크로써 구조물 응답 등의 데이터 측정 시기를 스스로 결정하며, 네트워크 자체의 상태를 파악하여 조치하고, 이상 징후 발생 시 이메일로 운영자에게 알려주는 기능을 갖고 있다.

#### 4. 맺음말

스마트 센서 기술은 기존의 SHM 시스템이 가진 문제점을 해결하고 신뢰성을 향상시킬 수 있는 많은 가능성을 갖고 있다. 이에 한미일 공동연구팀은 제2진도대교에 무선센서 네트워크를 설치하여 연구를 수행함으로써 그

러한 가능성을 더욱 구체화하고 있다. 📄

담당 편집위원 : 양근혁(경기대학교) yangkh@kyonggi.ac.kr

#### 참고문헌

1. Pakzad, S.N., Fennes, G.L., Kim, S. and Culler, D.E., "Design and Implementation of Scalable Wireless Sensor Network for Structural Monitoring", J. Infrastruct. Syst., 2008, Vol. 14, No. 1, pp. 89 ~ 101.



**심성한 교수**는 미국 일리노이 주립대학교 토목환경공학과에서 구조건전성 모니터링으로 박사학위를 취득하였고, 2011년부터 울산과학기술대학교 도시환경공학부에서 교수로 재직하고 있다. 주 연구분야는 무선센서 네트워크를 이용한 구조물 모니터링이다.  
ssim@unist.ac.kr