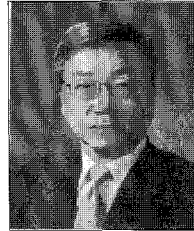
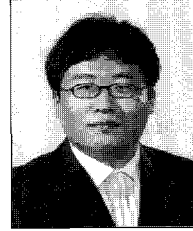


사회기반시설물의 안전감시를 위한 스마트 무선 센서 기술

Smart Wireless Sensor Technologies for Structural Health Monitoring of Civil Infrastructures



윤정방*



조수진**



민지영**

*KAIST 건설 및 환경공학과 교수/스마트 사회기반시설 연구센터 소장
** KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정

1. 서론

우리 삶의 기반을 이루는 교량, 빌딩, 터널, 도로 등과 같은 사회기반시설물들은 그 사용기간 동안에 여러 가지 환경 하중에 노출되는 특징을 가지고 있다. 환경 하중이란 온도 및 습도의 변화에 의한 하중이나 바람과 같은 대기에 의한 하중, 지반의 움직임에 의한 하중을 의미하는데, 특히 지진이나 태풍과 같은 경우는 극한적인 환경하중의 경우라고 할 수 있다. 이러한 환경하중에의 반복적 노출은 사회구성원의 안전을 위하여 선행적으로 보장되어야 하는 사회기반시설물의 안전에 대한 지속적인 관심을 요구하는 원인이다. 1994년의 성수대교 붕괴나 1995년 삼풍백화점 붕괴로 대표되는 국내의 사회기반시설물 사고는 수많은 인명피해를 유발하였을 뿐만 아니라, 사회 및 경제적으로도 수많은 문제점들을 야기하였다. 성수대교 붕괴 이듬 해에는 ‘시설물의 안전관리에 관한 특별법’이 제정되는 등, 국내에서도 사회기반시설물의 안전감시를 위한 많은 노력이 기울여지고 있다.

사회기반시설물의 안전감시는 또 다른 측면으로 시설물의 유지관리, 보수 및 보강, 재시공에 드는 비용을 절감시킬 수 있는 수단이 될 수 있다. 그러나 일반적으로 센서, 케이

블, 데이터 저장소(로거 및 서버)로 구성되는 기존의 안전감시 시스템을 구축하는데 있어서 큰 장애물은 그 구매 및 설치에 시간과 비용이 많이 든다는 점이다. 일반적으로 신뢰성있는 데이터의 수집을 위하여, 안전감시 시스템은 굵은 동축케이블과 같은 외부환경에 대한 내구성이 높고 선재의 밀도가 높은 케이블을 이용하여 센서와 데이터 저장소를 연결한다. 그러나 규모가 큰 사회기반시설물에 이러한 케이블을 설치하는 것은 매우 비용이 많이 소모되며 노동집약적이다. 일례로, 고층빌딩에 안전감시 시스템을 설치하는데 센서 채널(Channel) 당 약 5,000달러의 비용이 든다는 사실이 보고된 바 있다(Celebi, 2002). 대형 구조물의 현 상태를 정확하게 진단하기 위하여는 안전감시 시스템에 활용되는 센서의 개수와 케이블의 길이가 증가하여야 하며, 이는 안전감시 시스템에 드는 비용이 센서의 개수에 따른 선형적 비율보다 더 빠르게 증가되는 결과를 낳는다. 예를 들면, 홍콩의 TsingMa 대교에 350개의 센서를 설치하는데 드는 비용은 약 8백만 달러를 초과한 것으로 추정되고 있다(Farrar, 2001). 시간이 지남에 따라서 발생하는 안전감시 시스템 자체의 유지관리 비용까지도 감안한다면, 전체적인 안전감시 시스템의 구축에 드는 비용은 기하급수적으로 증가하게 된다. 즉, 충분한 예산이 확보되지 않는다면, 이러한 안전감시

시스템 구축의 경제적 한계점은 사회기반시설물의 상태를 정확하게 판단하기 위한 충분한 분량의 센서를 설치하지 못하는 결과를 낳을 수 있다.

최근 들어서 경제적이고 정확한 안전진단 시스템 구축을 위한 하나의 방안으로 스마트 무선 센서가 대두되고 있다. 스마트 무선 센서는 무선통신을 기반으로 하면서 연산능력을 내장하고 있는 센서로서, 내장형 마이크로컨트롤러(Microcontroller), 계산능력(Computational Capability), 무선통신(Wireless Communication), 배터리 전원(Battery Powered), 저비용(Low-cost)의 다섯 가지 특징을 갖는다(Nagayama, 2007). 대형 사회기반시설물에 많은 센서를 활용한 안전진단 시스템을 구축할 경우, 센서와 데이터 저장소간을 연결하는 무선 통신은 가격의 관점에서만 보아도 큰 장점을 갖는다. 위에서도 설명하였듯이, 내장 연산능력과 무선 통신을 활용한 저비용의 스마트 무선 센서를 대형구조물의 필요 위치에 최대한 많이 설치함으로써 안전진단 시스템의 경제성 및 정확도를 혁신적으로 개선시킬 수 있을 뿐만 아니라, 심각한 하중의 재하 및 지속적인 열화로 인하여 발생한 구조적인 손상을 발견하고 정량화하기 위한 충분한 정보를 제공함으로써 사회기반시설물의 현재 상태를 보다 명확하게 파악할 수 있도록 도움을 줄 것으로 기대되고 있다.

본문에서는 사회기반시설물의 안전감시를 위한 스마트 무선 센서 기술의 최근 연구 동향을 KAIST와 미국 Michigan 대학교, UIUC(University of Illinois at Urbana-Champaign)의 공동 연구 성과를 중심으로 기술하고자 한다. 우선 스마트 무선 센서를 구성하는 요소들에 대해 간략하게 기술하고, 학계와 산업계에서 개발된 무선 센서들과 그 특징을 설명하였다. 그리고 KAIST가 Michigan 대학교, UIUC와 공동으로 수행한 스마트 무선 센서를 활용한 사회기반시설물의 안전감시 기술개발의 성과를 기술하고, 좀 더 발전된 기술 개발을 위한 국제 공동 연구과제에 대하여 서술하였다.

2. 스마트 무선 센서 기술

2.1 스마트 무선 센서 구성 요소

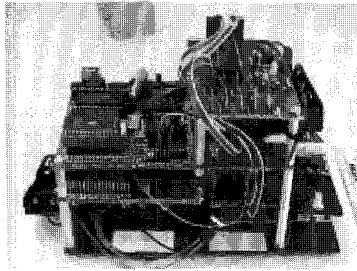
일반적으로 스마트무선 센서는 계측부(Sensing Interface), 연산부(Computational Core), 무선통신부(Wireless Transceiver)의 세 가지 기능적 요소들로 이루어지며, 필요 시 가진부(Actuation Interface)가 추가될 수 있다(Lynch, 2006). 계측부는 센서와 센서로부터 들어오는 아날로그 자료를 내장된 마이크로컨트롤러가 처리할 수 있도록 디지털화하는 아날로그-디지털 변환기(ADC: Analog-to-digital Converter)로 구성된다. 연산

부는 계측된 데이터와 저장된 변수들을 활용하여 연산을 수행하기 위한 마이크로컨트롤러, 계측되고 처리된 데이터를 저장하기 위한 RAM(Random Access Memory), 그리고 시스템의 동작과 데이터 처리 알고리즘을 내장하는 플래시 메모리(Flash Memory)로 구성된다. 무선통신부는 계측된 데이터나 내장 알고리즘에 의하여 후처리(Post-processing)된 데이터를 다른 스마트 무선 센서나 데이터 로거 및 서버와 통신하기 위한 라디오 주파수 모듈(RF Modem)과 안테나(Antenna)로 구성된다.

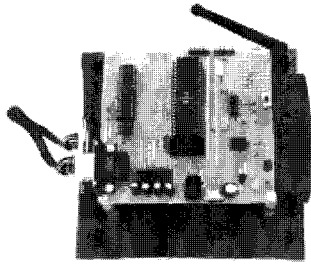
스마트 무선 센서의 구성 요소를 이해하는 것은 스마트 무선 센서를 사회기반시설물의 안전감시에 적용하는데 있어서 매우 중요한 요소이다. 구조물에 안전감시 시스템을 적용할 경우, 각 구성요소의 성능과 기능은 구조물의 형태, 감시하고자 하는 물리량, 센서의 위치, 그리고 구조물의 환경에 따라 신중하게 선택되어야 하기 때문이다. 일례로, 진동 기반의 안전감시 알고리즘을 구조물에 적용하고자 한다면 16비트 혹은 그 이상의 해상도를 갖는 ADC를 써야 하는데, 이는 일반적으로 사회기반시설물에서 발생하는 진동의 크기가 매우 작기 때문이다. 또한 무선통신부는 센서의 위치 및 간격에 따라서 충분한 전송 범위를 갖도록 설계되어야만 안정적인 데이터의 전송이 가능하다. 만일 내장 연산 알고리즘이 긴 시간이력의 데이터와 많은 연산을 요구한다면, 마이크로컨트롤러와 부속 메모리 역시 큰 데이터 전송 버스(Bus)와 메모리 공간을 가져야만 한다. 일반적으로 고주파 데이터를 이용하는 음파 및 초음파 비파괴 기법을 활용하고자 할 경우에는 ADC가 매우 빠른 샘플링(Sampling) 능력을 가져야하며, 주변 기기 역시 빠르게 샘플링되는 데이터를 처리할 수 있도록 설계되어야만 한다.

2.2 개발된 스마트 무선 센서 플랫폼

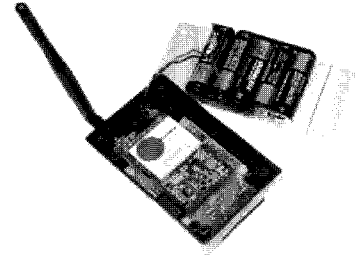
건축, 기계, 항공·공학 분야에서 스마트 무선 센서에 관한 관심이 증가함에 따라서 수많은 스마트 무선 센서들이 학계와 산업계에서 개발되었다 (그림 1). Straser와 Kiremidjian(1998)은 최초로 마이크로컨트롤러에 무선 라디오 모듈을 결합하여 토목구조물에 활용할 수 있는 무선 모듈 모니터링 시스템(WiMMS: Wireless Modular Monitoring System)을 제안하였다. Lynch 등(2001)은 WiMMS의 연산능력을 개선한 스마트 무선 센서를 개발하였으며, 이후 Wang 등(2005)은 데이터를 계측하면서 동시에 계측된 데이터를 전송할 수 있는 등의 다중작업이 가능한 소프트웨어를 내장함으로써 이를 더욱 개선하였다. Aoki 등(2003)은 교량 등의 사회기반시설물의 안전감시를 목적으로 하는 RIMS(Remote intelligent monitoring system)를 개발하였다. RIMS는 고주파수의 클럭(Clock)을 갖는 마이크로



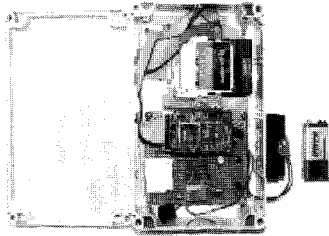
(a) WiMMS (Straser 등, 1998)



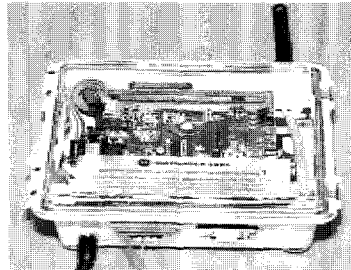
(b) WiMMS (Lynch 등, 2001)



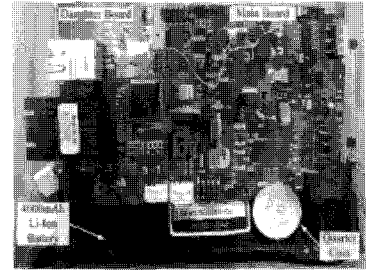
(c) WiMMS (Wang 등, 2005)



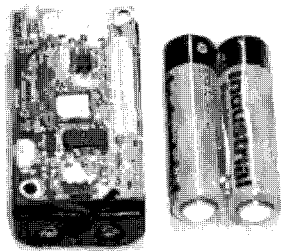
(d) RIMS (Aoki 등, 2003)



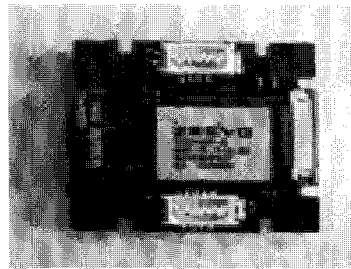
(e) Husky (Farrar 등, 2005)



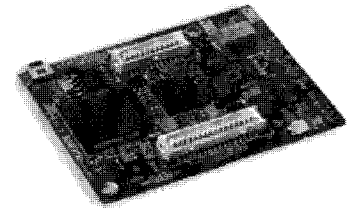
(f) DuraNode (Chung 등, 2004)



(g) MICA2 Mote (Crossbow)



(h) Imote (Intel)



(i) Imote2 (Intel)

그림 1 다양한 스마트 무선 센서 플랫폼

컨트롤러와 3축 MEMS형 가속도계, 그리고 이더넷 프로토콜 (Ethernet Protocol)로 시스템을 제어할 수 있는 인터넷 기반의 무선 모뎀도 갖추었다. Chung 등(2004)은 교량과 건물의 안전 감시를 위한 무선 센서 플랫폼 DuraNode를 개발하였다. DuraNode는 기존의 무선 센서와는 다르게, 기존의 유선 인터넷망이 갖추어진 건물 내에서의 안정적으로 활용할 수 있도록 인터넷 기반의 유선 통신 모뎀을 함께 갖춘 것이 특징이다. Farrar와 Allen(2005)은 Husky라는 이름의 스마트 무선 센서 플랫폼을 개발하였으며, Husky는 미국 Los Alamos 연구소에서 개발한 구조물 안전감시 알고리즘 패키지인 DIAMOND II와 완전 호환이 가능하도록 설계함으로써 구조물의 안전감시에 좀 더 용이하게 활용할 수 있도록 하였다.

이와 같은 학계에서의 노력과 더불어, 구조물 안전감시를 위한 수많은 스마트 센서들이 산업계에서 소비자들의 필요(Needs)를 만족시키기 위하여 개발되었다. 최초로 미국 버클리대학교(UC Berkeley)에서 개발되고 Crossbow사에 의하여 상용화된 Mote는 가장 널리 알려진 플랫폼으로써, 대중들에게 하드웨어뿐만 아니라 TinyOS(Levis 등, 2005)라는 이름

으로 널리 알려진 소프트웨어까지 개방함으로써 지속적인 발전을 거듭한 오픈 소스(Open Source) 스마트 무선 센서 플랫폼이다. Mote는 Crossbow사에 의하여 MICA, MICA2, MICA-Z, Telos 등으로 지속적인 발전을 해왔으며, Intel에 의하여 Imote, Imote2로 발전하였다. Imote2는 Xscale 32비트 마이크로컨트롤러와 32MB RAM, 32비트 플래시 메모리, 2.4GHz기반의 Zigbee 무선 모뎀 등 현재 가장 높은 하드웨어 사양으로 구성된 스마트 무선 센서로서(Crossbow, 2009), 사회기반시설물의 안전감시 외에도 다양한 용도로 활용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. UIUC의 Rice 등(2008a)은 사회기반시설물의 안전감시에 활용할 수 있는 Imote2 호환가속도 센서 보드를 개발하였으며, 동경대학교의 Nagayama 등(2008)과 Rice 등(2008b)은 Imote2를 실제 사회기반시설물의 안전감시에 손쉽게 적용할 수 있도록 하기 위한 오픈 소스 미들웨어(Middleware) 서비스인 Illinois SHM Services Toolkit을 개발, 웹 기반으로 대중에 공개하였다 (<http://shm.cs.uiuc.edu/software.html>).

이 외에도 다양한 스마트 무선 센서들이 학계와 산업계

에서 개발되었으며, 그에 관한 자세한 정보는 Lynch 등의 논문(Lynch 등, 2006; Lynch, 2007)을 참조할 수 있다.

3. 사회기반시설물 안전감시를 위한 스마트 무선 센서 기술 사례

본 장에서는 다양한 사회기반시설물의 안전감시에 스마트 무선 센서를 적용한 네 가지의 사례를 소개할 것이다. 첫 번째 사례는 미국 Michigan대학교에서 수행한 연구로써, 스마트 무선 센서 플랫폼 WiMMS의 무선 센서 네트워크(Wireless SensorNetwork)를 활용하여 오래된 극장 발코니의 분산형 모드 해석(Distributed Modal Identification)을 수행하였다(Zimmerman 등, 2008). 두 번째 사례는 KAIST와 Michigan대학교의 연구진이 공동으로 수행한 연구로써, WiMMS의 내장 연산 기능을 이용하여 개발한 무선 기반의 저비용 케이블 장력 계측 시스템의 개발에 관한 연구이며(Cho 등, 2008), 실험실에 설치한 모형 케이블에 실제 적용하여 그 성능을 검증하였다. 세 번째 사례는 KAIST에서 수행한 연구로써, 비파괴 검사를 위한 능동형 압전 무선 센서 노드 개발에 관한 내용으로, KAIST에서 개발한 손상 지수를 이용하여 실제 건물의 볼트 풀림을 탐지한 사례를 제시하였다. 마지막 사례는 미국 UIUC의 연구 성과로, Imote2의 센서 네트워크상에 진동 기반 분산형 손상 알고리즘을 탑재시켜서 자동적으로 구조물의 손상을 추정할 수 있는 시스템을 개발하고, 실내 트러스 구조 모형을 이용한 실험으로 그 성능을 검증한 사례이다.

3.1 WiMMS를 이용한 분산 모드 해석

계측한 데이터로부터 추출된 고유진동수나 모드 형상과 같은 구조물의 모드 정보는 구조물의 성능을 평가하거나 해석 모델을 보정하는데 매우 중요하게 활용된다. 본 사례에서는 최신 스마트 무선 센서 기술을 모드해석에 활용하

기 위하여, 응답만을 활용하여 구조물의 모드 정보를 추출하는 피크 피킹 방법(PP: Peak Picking)과 주파수 영역 분해 기법(FDD: Frequency Domain Decomposition)을 수정하여 분산된 무선 센서네트워크에 적용하였다(Zimmerman 등, 2008). 우선 피크 피킹 방법은 고유진동수를 추출하는데 활용되었다. 각 센서로부터 계측된 가속도 신호는 WiMMS에 내장된 고속 푸리에 변환(FFT: Fast Fourier Transform)을 통하여 주파수 영역의 푸리에 스펙트럼(FS: Fourier Spectrum)으로 변환된다. 각 센서는 푸리에 스펙트럼에서 가장 큰 피크들을 찾은 뒤, 이를 센서 네트워크 상에서 공유하여 가장 많이 발견된 피크를 찾고, 이를 구조물의 고유진동수로 인식한다. 주파수 영역 분해기법은 피크 피킹 방법으로 얻은 고유진동수를 기반으로 모드형상을 추출하는데 활용되었다. 각 센서 노드는 고유진동수에서의 푸리에 스펙트럼 값을 계산한 뒤, 미리 2개씩 짝지어진 센서 노드끼리 서로 통신함으로써 2자유도 PSD(Power Spectral Density)를 계산하고, 이를 특이치분해(SVD: Singular Value Decomposition)하면 2개 센서 노드에서 계산된 각 고유진동수에서의 모드형상을 구할 수 있으며, 이 모드 형상들은 네트워크 상으로 전파됨으로써 최종적으로 전체 시스템의 모드형상을 구할 수 있게 된다.

스마트 무선 센서 네트워크를 활용한 분산 모드해석 기법의 검증을 위하여, 한 오래된 극장의 발코니에 21개의 WiMMS 센서 노드를 설치하고 진동 실험을 수행하였다. 그림 2는 극장의 전경과 설치된 센서 위치를 나타낸다. 우선 첫 번째 진동시험에서 데이터 모두를 PC로 전송하여 처리하는 기존의 FDD방법을 이용하여 모드 해석을 수행하고, 두 번째 진동시험에서는 제안한 센서 네트워크 상에서의 분산 모드해석 기법으로 모드 해석을 수행하였다. 그림 3은 제안 기법으로 추정된 고유진동수와 모드 형상으로, 이는 기존 FDD에 의하여 얻은 결과와 매우 유사한 결과로 나타났다. 자세한 내용은 Zimmerman 등(2008)의 논문을 참조할 수 있다.

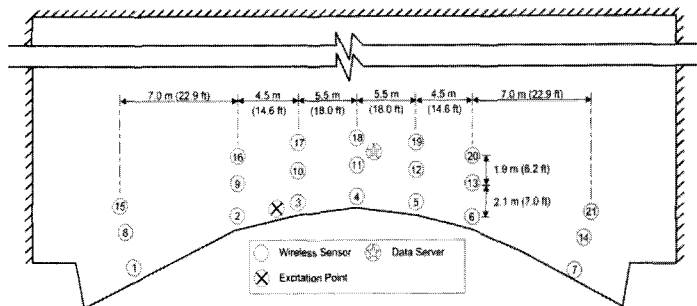
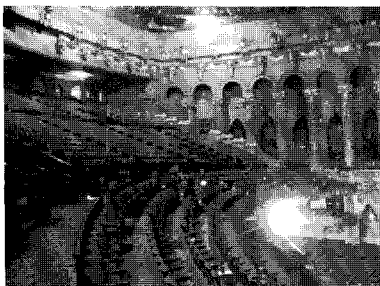
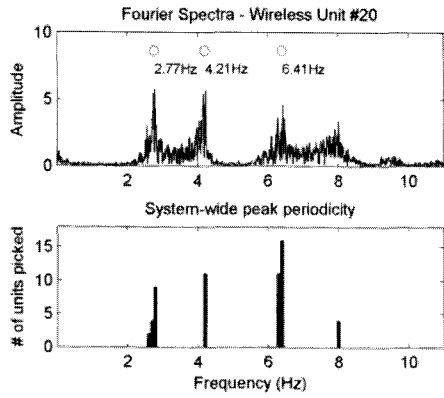
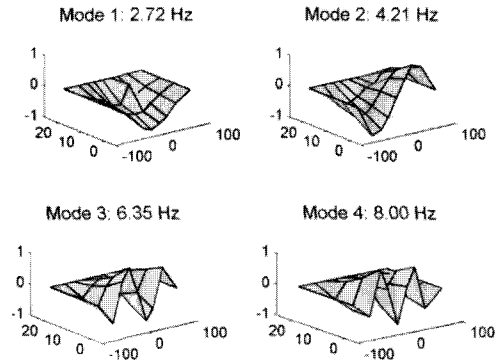


그림 2 극장 발코니 전경과 센서 설치 위치 (Zimmerman 등, 2008)



(a) 피크 피킹 방법 (고유진동수)



(b) 주파수영역 분해기법 (모드 형상)

그림 3 제안 기법으로 검출된 극장 발코니의 모드 정보 (Zimmerman 등, 2008)

3.2 사장교 케이블 장력 추정을 위한 무선 장력계 개발

사장교에서 케이블은 구조계 전체 하중의 대부분을 차지하는 사하중을 지지하는 부재로써, 교량의 구조적 안정성에 가장 중요한 역할을 담당하며, 따라서 하중을 지지하는 케이블의 장력은 시공 중, 그리고 사용 중에도 지속적으로 감시된다. 본 사례에서는 사장교 케이블의 장력을 저비용으로 손쉽게 감시하기 위하여, 스마트 무선 센서에 진동 기반의 장력 추정 기법을 내장한 무선 장력계를 개발하였다. 본 무선 장력계는 위에서 소개한 WiMMS와 저렴한 MEMS형 상용 가속도계, 그리고 계측된 가속도 신호를 개선하기 위한 신호처리회로(Signal conditioning circuit)로 구성되었다. 또한 수집된 가속도 신호로부터 고유진동수를 얻기 위한 자동 피크 피킹 알고리즘과 고유진동수를 이용하여 케

이블의 장력을 추정하는 실용공식(Zui 등, 1996)이 WiMMS에 내장되었다. 무선 MEMS형 상용 가속도계를 통해 계측된 가속도 신호는 신호처리회로에 의하여 증폭되고 필터링된 뒤, 센서 노드에 내장된 FFT 알고리즘에 의하여 푸리에 스펙트럼으로 변환된다. 자동 피크 피킹 알고리즘은 얻어진 푸리에 스펙트럼으로부터 최소 2개 이상의 고유진동수를 추출하며, 추출된 고유진동수는 케이블의 장력 및 처짐 상태에 따라 반복적으로 연산하도록 수정된 실용공식에 입력됨으로써 최종적으로 케이블의 장력을 추정한다.

개발된 무선장력계의 검증을 위하여, 그림 4와 같은 사장교 케이블 모형에 3개의 무선 장력계를 설치하고, 장력과 처짐 조건을 달리하여 총 10 세트의 실험을 실시하였다. 장력은 케이블 끝에 설치된 미리 보정된 4개의 변형률계의 변형률 신호를 통하여 계측하였다. 3개의 무선 장력계는 모든 조건에서 실제 케이블의 고유진동수를 매우 잘 추정하

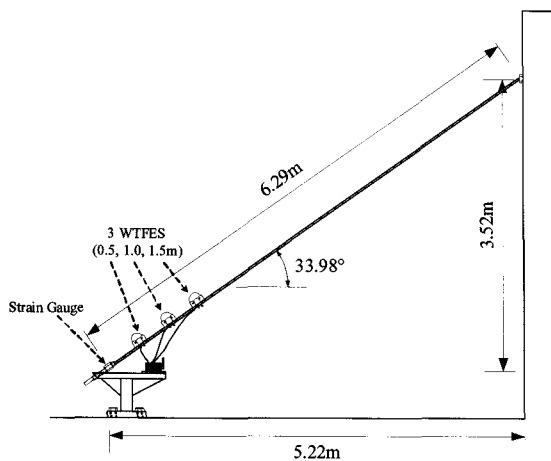


그림 4 사장교 케이블 모형 및 센서 위치(Cho 등, 2008)

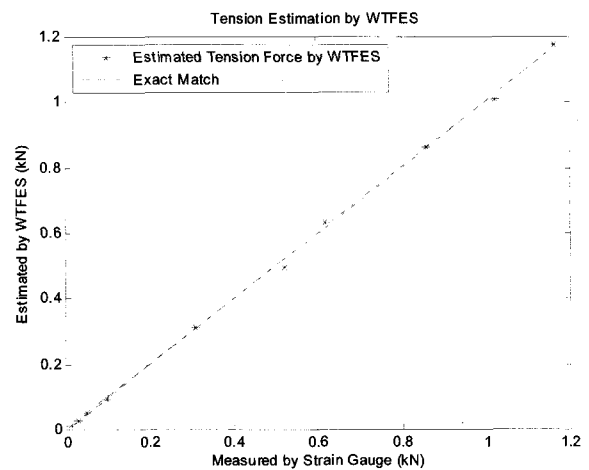


그림 5 변형률계로 계측한 케이블의 실제 장력과 무선 장력계로 추정된 장력의 비교(Cho 등, 2008)

였으며, 추정된 고유진동수를 이용하여 실제 케이블의 장력에 매우 근사한 장력을 그림 5와 같이 추정하였다. 본 시스템은 차후 실제 사장교 케이블에 적용하여 그 성능을 추가적으로 평가할 예정이다. 자세한 내용은 Cho 등(2008)을 참조할 수 있다.

3.3 압전 임피던스 무선 센서 노드 개발

압전 임피던스 기반 안전감시 기술은 구조물에 소형 압전 센서를 부착하여, 수 kHz에서 수 MHz 범위의 고주파 영역에서 계측한 전기적 임피던스 신호의 변화를 모니터링하는 것이다. 본 사례에서는 기존의 임피던스 측정분석기(예: HP4294A)의 고비용 측면(약 \$40,000) 및 휴대성 문제를 보완하기 위하여, 임피던스 측정칩인 AD5933(©Analog Device)을 장착한 기존의 액티브 센서 노드(Mascarenas 등, 2006)를 하드웨어와 소프트웨어 측면에서 개선시킨 스마트 무선 센서 노드를 개발하였다. AD5933을 통해 측정된 임피던스 데이터는 Zigbee 기반의 무선 RF 모듈을 통하여 컴퓨터 서버로 전송된다. 추가적으로 온도 및 잔여 배터리량을 확인할 수 있게 설계되었으며, 센서노드에 내장된 마이크로컨트롤러에서의 연산을 통하여 구조물의 손상에 활용될 수 있는 온도보상 전의 RMSD값 및 온도보상된 상호 상관도(CC: Cross-correlation coefficient, Koo 등, 2009)값을 전송함으로써 서버에서의 추가적인 신호처리 없이도 구조물의 모니터링이 가능하도록 설계되었다.

개발된 센서노드의 검증을 위하여 그림 6에서와 같이 2개의 강관 경사 기둥이 4개의 볼트로 보조 지지 철판과 콘크리트 블록에 고정되어 있는 구조물에서 볼트 풀림 탐색 실험을 수행하였다. 손상 시나리오는 표 1과 같으며, 각 손상 경우에 대해 획득한 50-55kHz 구간의 임피던스 신호를 그림 7에 나타내었다. 그림 8에서 보듯이 손상 탐색 알고리즘을 통해 센서노드로부터 획득한 온도보상된 CC값은 손상에 따라 뚜렷하게 감소하는 경향을 보여, 본 센서노드가 손상 탐색에 효과적임을 검증하였다.

표 1 손상 시나리오

경우	손상 내용
1	손상 무
2	볼트 1번 풀림
3	볼트 1번 & 2번 풀림

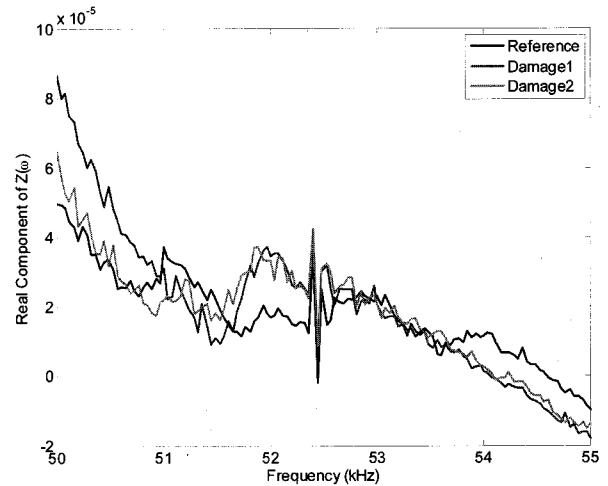


그림 7 획득한 임피던스 신호

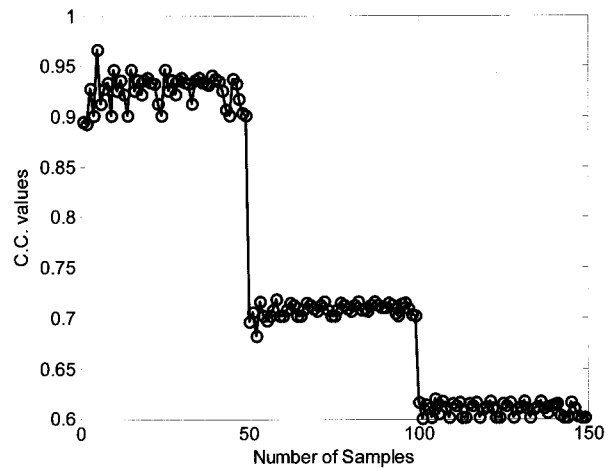
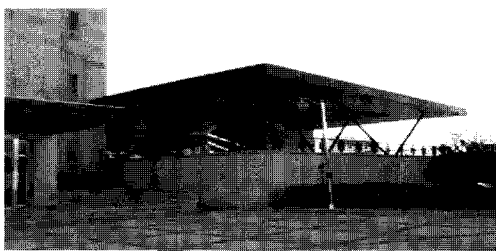
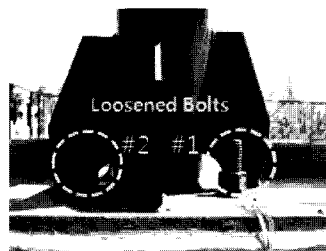


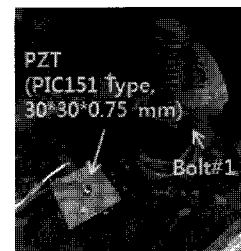
그림 8 온도보상된 CC값



(a) 대상 구조물



(b) 볼트 풀림 탐색



(c) 센서의 위치

그림 6 실험 상세

3.4 Imote2를 이용한 자동 분산형 손상 추정 시스템

본 사례는 Imote2로 구성된 센서 네트워크를 이용하여 구조물의 손상을 자동으로 추정하는 시스템의 개발에 관한 것으로, 진동 기반의 손상 추정 기법을 Imote2 센서 네트워크에 분산시켜 각각의 센서 그룹으로부터 얻어진 손상 정보를 종합하여 전체 구조계의 손상을 찾아내도록 하였다. 본 시스템은 Imote2 하드웨어(Crossbow, 2009)와 TinyOS(Levis 등, 2005), 오픈 소스 미들웨어(Nagayama 등, 2008; Rice 등, 2008b), 계층적 네트워크 토폴로지(Hierarchical network topology), 그리고 본 시스템에 맞게 수정된 손상 추정 알고리즘(Nagayama 등, 2007)으로 구성되었다. 각 센서 노드는 그림 9와 같은 군집(Community)을 형성하고, 각각 관리자 노드(Manager node), 군장 노드(Cluster head node), 그리고 잎사귀 노드(Leaf node)로 계급화된다. 관리자 노드는 전체 네트워크를 총괄하며, 각 군장노드는 각 공동체를 통솔하고 이웃하는 공동체와 소통하는 역할을 담당한다. 각 군집에서는 계속된 가속도데이터를 군장노드로 보내어, 이를 시간 기반의 시스템 해석 기법인 ERA(Eigensystem realization algorithm)로 해석, 군집이 위치한 부분구조계에서의 모드 정보와 시스템 행렬 등의 정보를 얻는다. 얻어진 정보를 기반으로 추계론적 손상위치 벡터 기법(SDLV: Stochastic damage locating vector, Bernal, 2006)을 활용

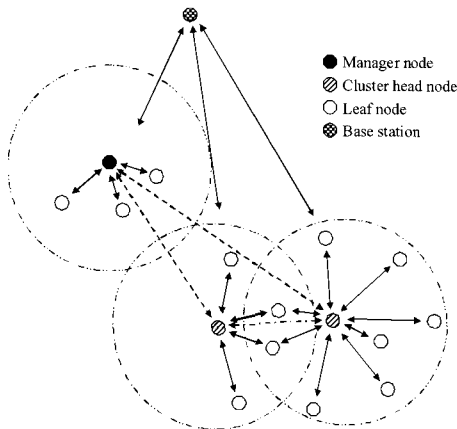


그림 9 개발된 시스템 구조(Nagayama, 2007)

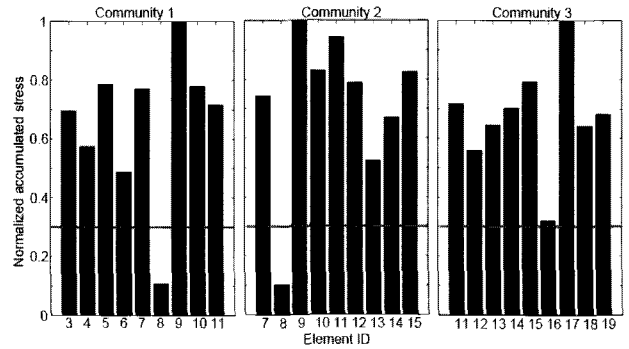


그림 11. 각 군집에서 얻어진 각 부재의 누적 응력 (Rice 등, 2008a)

하여 부분구조계의 손상 정보를 파악한 뒤, 인접한 군집의 손상 정보를 공유함으로써 전체 구조계의 손상 상태를 파악한다.

위의 시스템의 성능 검증을 위하여 3차원 트리스 모형에 총 10개의 Imote2를 설치하였다. 각각의 Imote2는 그림 10과 같이 6개의 Imote2들이 하나의 군집을 형성함으로써 총 3개의 겹치는(overlapping) 군집을 형성하게 되었다. 우선 무손상 상태에서 데이터를 수집하고 난 뒤, 군집 1(Community 1)과 군집 2(Community 2)에 의하여 예측되는 8번 트리스부재에 손상(52.7%의 강성 감소)을 가하였다. 그림 11은 최종적으로 SDLV에 의하여 얻어진 누적응력(0에 가까울수록 손상이 발생하였음을 의미)을 표시한 것으로, 군집 3과 달리 군집 1과 군집 2에서 8번부재의 손상을 매우 잘 추정해냄으로써 본 시스템이 구조물의 손상 평가에 매우 잘 활용될 수 있음을 보여주었다. 자세한 내용은 Gao and Spencer(2008)를 참조할 수 있다.

4. 스마트 무선 센서 기술에 관한 국제 공동 연구

4.1 한-미 국제공동연구 : 스마트센서 기술 개발을 위한 테스트베드 구축

한국과학재단지정 우수연구센터인 KAIST 스마트 사회기

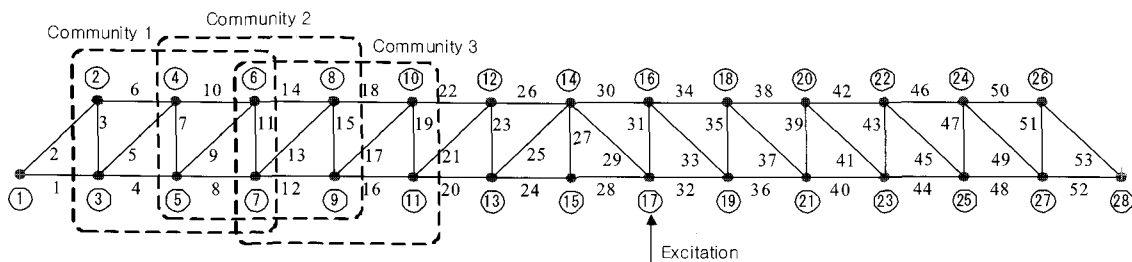


그림 10 3차원 트리스 모형의 구조와 형성된 센서 군집 (Rice 등, 2008a)

반시설 연구센터에서는 스마트 센서를 활용하여 구조물의 응답을 예측하고 국부 및 전역 모니터링 시스템을 구축하기 위한 한-미 국제 공동연구과제를 수행하고 있다. 본 과제는 2007년 9월부터 3년간 진행되는 과제로서, 미국과학재단 및 한국과학재단, 한국도로공사의 지원을 받아 진행된다. 미국측에서는 Maryland대학교, Northeastern대학교, Michigan대학교, California-Irvine대학교가 참여하며, 한국측에서는 KAIST, 부경대학교, 세종대학교, 홍익대학교가 참여하여 각 참여팀에서 개발한 센싱 시스템인 (1) 국부적인 손상을 감지하기 위한 능동형 압전 센서(Kim 등, 2006)와 Piezoelectric Paint Sensor(Zhang, 2006), (2) 사장교 케이블의 응력을 효율적으로 예측할 수 있는 EM센서(Wang 등, 1998), (3) 교량의 상시진동을 예측하는 가속도센서 유선 시스템 및 무선 가속도 센서노드(Yi 등, 2006; Lynch 등, 2008), (4) 구조물 표면의 손상을 탐색하는 이미지 프로세싱 시스템(Lee 등, 2006)을 테스트베드에 구축하여 검증한다.

한국도로공사에서는 중부내륙고속도로상의 여주JC-감곡IC 사이에 총 연장 7.7km의 편도 2차선 도로인 시험도로 구간을 건설한 바 있다. 이 구간에는 PC I-거더 교량과 PC 사장형교로 이루어진 금당교, 개구제 강상자형교인 연대교, 그리고 강관형교인 삼승교의 3개 교량이 존재한다. 아래는 연대교의 모드 정보 분석을 위하여 스마트 무선 가속도 센서를 이용한 결과를 보여준다. Michigan대학교의 Lynch(2008)에 의해 개발된 저가형가속도 센서노드(가격: \$175)는 그림 12에서 보듯이 5x6x2cm의 크기로 매우 작으며, 센싱을 위한 4

개의 센서 채널과 데이터를 획득하는 16비트 ADC 컨버터, 내장신호처리를 위한 저전압 마이크로 컨트롤러, 무선 데이터 전송을 위한 250kbps RF 모듈로 구성된다. 이 노드는 5개의 AA 배터리로 동작하며, 전송거리는 약 50m이다. 교량의 기하학적인 형상과, 제한된 전송거리로 인해 무선 센서노드 20개를 연대교에 설치한 다음(그림 13) 3회의 로빙(Roving) 테스트를 통해 시속 30km/hr부터 70km/hr까지 25톤 트럭하중에 대한 총 50point의 가속도 신호를 100Hz의 샘플링 주파수로 90초 동안 획득하였다(그림 14). 이렇게 50개의 노드로부터 무선으로 전송된 가속도 신호를 사용하여 FDD 기법을 통한 연대교의 모드 해석을 수행하였으며, 그 결과 그림 15와 같이 기존의 유선 가속도계 시스템과 유사하게 공진 주파수 및 모드 형상을 구할 수 있었다.

4.2 한-미-일 국제공동연구 : 사장교 건전성 모니터링을 위한 스마트 무선 센서 기술 개발

본 과제는 한국학술진흥재단의 지원으로 2009년부터 2011년까지 3년간 이루어지는 국제 공동연구과제로써, 한국에서는 KAIST와 서울대학교, 세종대학교가, 미국에서는 UIUC, 일본에서는 동경대학교가 연구진으로 참여하고 있다. 본 과제는 스마트 무선 센서를 활용한 사장교의 건전성 모니터링 기술을 개발하고, 이를 실제 사장교에 적용함으로써 그 성능을 검증하는 것을 주 목표로 하고 있다. 이를 위하여 (1) 스마트 무선 센서에 적합한 다중 물리량 예측을 위한 통합

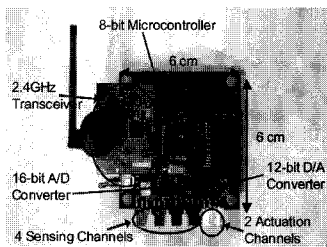


그림 12 무선 가속도 센서 노드(J. P. Lynch)

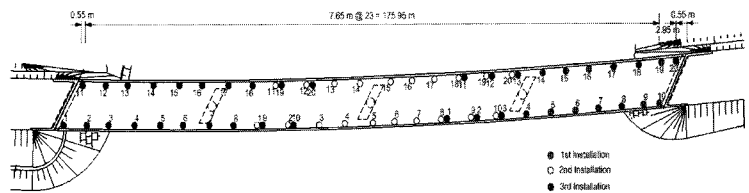


그림 13 센서 설치 위치

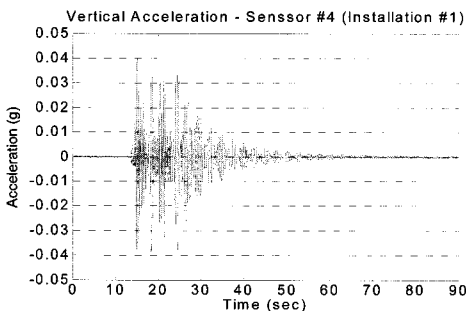


그림 14 4번 센서에서의 가속도 신호

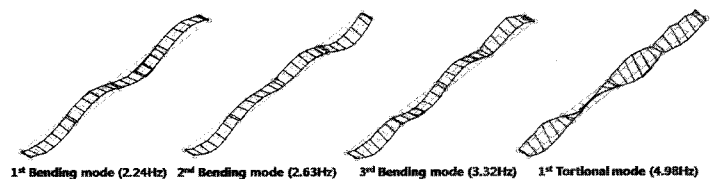


그림 15 공진 주파수 및 모드 형상 (FDD) (J. P. Lynch)



그림 16 진도대교 전경

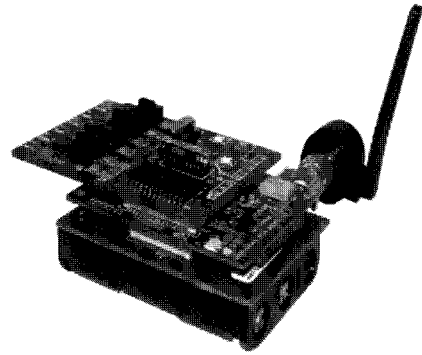


그림 17 Imote2

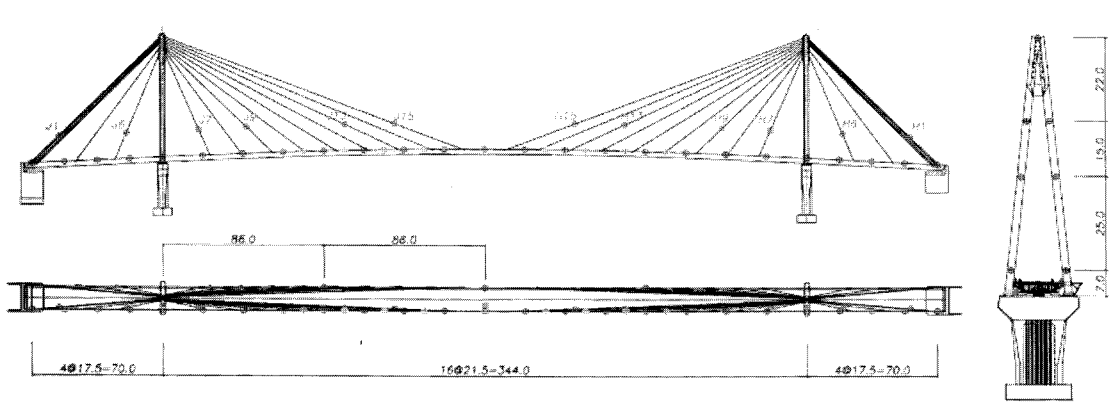


그림 18 진도대교 Imote2 설치계획 (약 70여개)

센서 보드 개발, (2) 센서 네트워크 상에서 분산 컴퓨팅 환경을 활용하는 내장 안전감시알고리즘의 개발, (3) 국제적 테스트베드 구축을 통한 스마트 무선 센서의 실 교량 안전감시에의 활용, (4) 실제 교량에의 활용을 통한 스마트 무선 센서 기반 안전감시 시스템의 장기적 성능 평가, (5) 관련 연구 그룹들의 지속적 협력 체계 구축을 세부적 목표로 하고 있다.

오는 6월에 구축 예정인 본 과제의 테스트베드는 전라남도 서남단에 위치한 제 2 진도대교(그림 16)이다. 제 2 진도대교는 전라남도 해남과 진도를 잇는 총 경간장 484m (70m+344m+70m)의 사장교로, 다이아몬드 형 주탑과 강상자형 거더로 이루어져있다. 본 과제에서는 제 2 진도대교의 관리주체인 익산지방국토관리청과 현대건설의 지원으로 스마트 무선 센서 기반 안전감시 시스템을 구축할 예정이다. 본 과제에서 사용하고 있는 스마트 무선 센서는 Intel에서 개발한 Imote2(그림17)로 그림 18와 같이 총 70여개의 Imote2가 설치될 예정이다. 진동기반의 건전성 감시를 위하여 미국 UIUC에서 개발한 Imote2 호환 가속도 센서 보드(SHM-A 보드)가 활용되며, 바람이 많이 부는 진도대교의 환경을 고려하여 풍속 및 풍압을 측정할 수 있는 Imote2 호환 풍속 및 풍압 측정 보드(SHM-W보드)를 개발, 활용할 예정이다. 또한

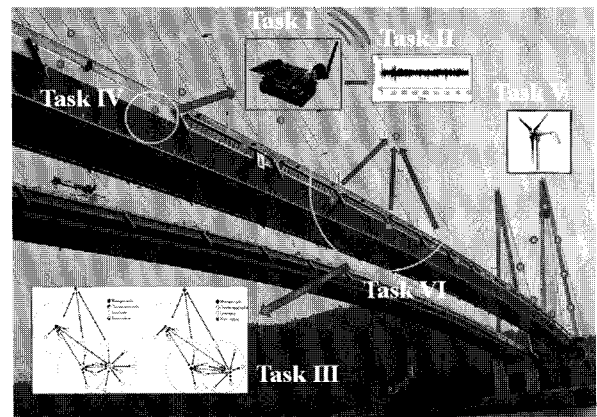


그림 19 제 2 진도대교 안전감시 시스템 개요

미국 UIUC와 일본 동경대학교에서 개발한 오픈 소스 미들웨어기반의 안전감시 소프트웨어를 이용, 그림 19와 같이 각 단계 별 신호의 분석 및 센서 네트워크의 구성을 통하여 자동적으로 구조물의 손상을 파악할 수 있는 시스템을 구성할 예정이다. 이렇게 획득된 데이터는 오프라인 및 웹 기반으로 공유됨으로써 제 2 진도대교의 정확한 해석 모델의 구축과 교량 유지관리, 그리고 관련 연구자들의 연구에 활용될 예정이다.

5. 결론

이상과 같이 사회기반시설물의 안전감시와 관련된 스마트 무선 센서기술의 현 주소를 되돌아보았다. 스마트 무선 센서를 구성하는 구성 요소와 개발된 스마트 무선 센서 플랫폼에 대하여 알아보았고, 4가지 스마트 무선 센서기반 안전진단 시스템의 활용 사례 및 관련 기술을 더 발전시키기 위한 국제 공동연구 사례도 소개하였다.

현재 스마트무선 센서 기술은 매우 빠르게 발전하고 있지만, 스마트 무선 센서가 실제 사회기반시설물의 안전감시에 다양하게 활용되기 위해서는 여러 분야에서의 보완이 필요하다. 하드웨어에 있어서는 통신범위, 데이터 전송 속도, 샘플링 속도 등이 개선될 필요가 있으나, 현재의 빠른 전자 기술의 발전 속도로 볼 때 이러한 부분은 곧 해결될 수 있으리라 예상된다. 그러나 하드웨어를 완벽하게 활용하기 위한 소프트웨어 기술과 안전 진단 알고리즘의 개발은 현재 하드웨어의 개발속도를 따라잡지 못하고 있으며, 이는 스마트 무선 센서 기술이 토목, 기계, 전자, 전산 분야의 기술을 모두 종합하는 학제간 연구를 필요로 하기 때문이다. 현재 많은 학교 및 산업계에서 이러한 문제를 해결하기 위한 다양한 교육 및 훈련 방안을 내어놓고 있으며, 그에 따라서 이 분야도 곧 하드웨어를 따라 빠른 발전을 할 것으로 기대된다. 스마트 무선 센서 기술에 있어서 가장 큰 난제는 바로 배터리 기술이며, 현재 배터리의 수명을 증가시키기 위한 연구와 더불어 전력 사용량을 줄이기 위한 네트워크 구성 기술, 에너지 생산(energy harvesting) 기술이 이를 해결할 수 있는 방법으로서 주목 받고 있다. 기술의 발전에 따라서 위의 문제들이 해결될 경우, 스마트 무선 센서는 크고 복잡한 사회기반시설물의 안전감시에 활용할 수 있는 경제적이고 안정적인 대안으로써 자리매김할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 기사를 작성하는데 도움을 준 미국 Michigan대학교의 J.P. Lynch교수, 미국 UIUC의 B.F. Spencer교수, 일본 동경대학교의 T. Nagayama교수께 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Aoki, S. Fujino, Y., and Abe, M. (2003). "Intelligent bridge maintenance system using MEMS and network technology," Proc. SPIE Conf., 5057, San Diego, CA, USA
2. Brincker, R., Zhang, L., and Anderson, P. (2001). "Modal

- identification of output-only systems using frequency domain decomposition," *Smart Materials and Structures*, 10 (3), pp. 441-445
3. 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
4. Cho, S., Lynch, J. P. and Yun, C-B. (2008). "Development of a low-cost automated tension estimation system forcable-stayed bridges," *Proc. ASME Conf. Smart Materials, Adaptive Structures& Intelligent Systems*, Ellicott City, MD, USA
5. Chung, H-C., Enomoto, T., Shinozuka, M., Chou, P., Park, C., Yokoi, I., and Morishita, S., (2004). "Real-time visualization of structural response with wireless MEMS sensors," *Proc. 13th world conf. Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada
6. Farrar, C. R. (2001). *Historical Overview of Structural Health Monitoring. Lecture Notes on Structural Health Monitoring Using Statistical Pattern Recognition*, Los Alamos Dynamics, Los Alamos, NM, USA
7. Farrar, C. R., Allen, D. W., Ball, S., Masquelier, M. P., and Park, G. (2005). "Coupling sensing hardware with data interrogation software for structural health monitoring," *Proc. 6th Int'l Symp. Dynamic Problems of Mechanics*, Ouro Preto, Brazil
8. Gao, Y. and Spencer Jr., B. F. (2008). "Structural health monitoring strategies for smart sensor networks," *Newmark Structural Engineering Laboratory report Series 011*
9. James, G. H., Carne, T. G., and Lauffer, J. P. (1993). "The natural excitation technique for modal parameter extraction from operating wind turbine," Report No. SAND92-1666, UC-261, Sandia National Laboratories
10. Kim, S. B. and Sohn, H. (2006) "Instantaneous reference-free crack detection based on polarization characteristics of piezoelectric materials," *Smart Materials & Structures*, 16, pp. 2375-2387
11. Koo, K-Y., Park, S., Lee, J-J. and Yun, C-B. (2008) "Automated Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporating Frequency Shift for Compensating Temperature Effects," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20, pp. 367-377
12. Lee, J-J. and Shinozuka, M. (2006) "Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques," *Experimental Mechanics*, 46(1), pp. 105-114

13. Levis, P., Madden, S., Polastre, J., Szewczyk, R., Whitehouse, K., Woo, A., Gay, D., Hill, J., Welsh, M., Brewer, E., and Culler, D. (2005). TinyOS: An Operating System for Sensor Networks. Ambient Intelligence, Weber, W., Rabaey, J.M., Aarts, E., Eds. 115-148, Springer, Berlin, Heidelberg
14. Lynch, J. P., Law, K. H., Kiremidjian, A. S., Kenny, T. W., Carryer, E. and Patridge, A. (2001). "The design of a wireless sensing unit for structural health monitoring," Proc. 3rd Int'l Ws. Structural Health Monitoring, Stanford, CA, September 12-14
15. Lynch, J. P. and Loh, K. J. (2006). "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring," The Shock and Vibration Digest, 38 (2), pp. 91-128
16. Lynch, J. P. (2007). "An overview of wireless structural health monitoring for civil structures," Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 365 (1851), pp. 345-372
17. Mascarenas, D. L., Todd, M. D., Park, G. and Farrar, C. R. (2006) "A Miniaturized Electromechanical Impedance-based Node for the Wireless Interrogation of Structural Health," Proceeding of SPIE's 13th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 6177
18. Nagayama, T., Spencer, B. F., Jr., Agha, G. A., and Mechitov, K. A., (2006). "Model-based data aggregation for structural monitoring employing smart sensors", Proc. 3rd Int'l Conf. Networked Sensing Systems, pp. 203-210
19. Nagayama, T. (2007). Structural Health Monitoring Using Smart Sensors. Ph. D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA
20. Nagayama, T. Spencer Jr., B.F., Mechitov, K. A., and Agha, G. A. (2008). "Middleware services for structural health monitoring using smart sensors." Smart Structures and Systems
21. Rice, J. A., and Spencer, Jr. B. F. (2008a). "Structural health monitoring sensor development for the Imtoe2 platform." Proc. SPIE Conf., 6932, San Diego, CA, USA
22. Rice, J. A., Mechitov, K. A., Spencer Jr., B. F., & Agha, G. A. (2008b). "A service-oriented architecture for structural health monitoring using smart sensors," Proc. 14th World Conf. Earthquake Engineering, Beijing, China
23. Straser, E. G. and Kiremidjian, A. S. (1998). A Modular, Wireless Damage Monitoring System for Structures. Technical Report 128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Palo Alto, CA, USA
24. Wang, M. L., Koontz, S., and Jarosevic, A. (1998) "Monitoring of cable forces using magneto-elastic sensors," Proceedings of the 2nd U.S.-China Symposium/Workshop on Recent Developments and Future Trends of Computational Mechanics in Structural Engineering, Dalian, China, pp. 337-349
25. Wang, Y., Lynch, J. P. and Law, K. H. (2005). "Validation of an integrated network system for real-time wireless monitoring of civil structures," Proc. 5th Int'l Ws. Structural Health Monitoring, Stanford, CA, September 12-14
26. Website : Crossbow Technology, Inc. (<http://www.xbow.com>)
27. Yi, J-H., Cho, S-J., Koo, K-Y., Yun, C-B., Lee, C-G., and Lee, W-T. (2007) "Structural Performance Evaluation of a Steel-Plate Girder Bridge Using Ambient Acceleration Measurements," Smart Structures and Systems, 3(3), pp. 281-298
28. Zhao, F. and Guibas, L. (2004). Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach. Morgan Kaufman, San Francisco, USA
29. Zhang, Y. (2006) "In-situ fatigue crack detection using piezoelectric paint sensor," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 17(10), pp. 843-852
30. Zimmerman, A. T., Shiraishi, M., Swartz, R. A. and Lynch, J. P. (2008) "Automated modal parameter estimation by parallel processing within wireless monitoring systems," Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 14 (1), pp. 102-113
31. Zui, H., Shinke, T. and Namita, Y. (1996). "Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method," Journal of Structural Engineering, ASCE, 122(6), pp. 651-656

[담당 : 이진학, 편집위원]