

구조물 건전성 모니터링을 위한 스마트 센서 관련 최근 연구동향

A Recent Research Summary on Smart Sensors for Structural Health Monitoring

김 은 진¹⁾
Eun-Jin Kim

조 수 진^{2)*}
Soo-Jin Cho

심 성 한³⁾
Sung-Han Sim

Abstract

Structural health monitoring (SHM) is a technique to diagnose an accurate and reliable condition of civil infrastructure by collecting and analyzing responses from distributed sensors. In recent years, aging civil structures have been increasing and they require further developed SHM technology for development of sustainable society. Wireless smart sensor and network technology, which is one of the recently emerging SHM techniques, enables more effective and economic SHM system in comparison to the existing wired systems. Researchers continue on development of the capability and extension of wireless smart sensors, and implement performance validation in various in-laboratory and outdoor full-scale experiments. This paper presents a summary of recent (mostly after 2010) researches on smart sensors, focused on the newly developed hardware, software, and validation examples of the developed smart sensors.

Keywords : Smart sensor, Structural health monitoring

1. 서 론

최근 노후화된 구조물의 수가 증가하고 구조물의 붕괴사 고가 자주 발생함에 따라, 그로 인한 피해를 줄일 수 있는 구조물 유지 관리 기술에 대한 중요성이 부각되고 있다. 구조물 건전성 모니터링 기술 (Structural Health Monitoring, SHM)은 구조물의 상태를 파악하고 진단, 평가하는 기술로서, 현재 전 세계적으로 활발하게 관련 기법 및 장비들에 관한 연구가 이루어지고 있다.

기존 SHM에서 주로 활용되는 유선 기반의 데이터 계측 방식은 장비의 가격이 비교적 높고 센서와 데이터 로거 (data logger)를 연결하기 위한 케이블 작업에 많은 노력과 비용이 소요되는 단점이 있다. 기존 유선센서 기반 계측시스템의 대안으로서, 무선 통신과 MEMS 센서, 내장 데이터처리 기술 (embedded processing)을 활용하는 스마트 센서 (smart sensor)가 개발되었다. Straser and Kiremidjian (1998)은 교량의 상

태평가를 목적으로 데이터 계측 및 무선 통신이 가능한 스마트 센서를 처음 개발하였고, 이후 스마트 센서의 성능과 구조물 모니터링에 그 활용성을 향상시키기 위한 다양한 연구 개발이 진행되어 왔다.

스마트 센서는 주로 무선 통신, 데이터 계측 및 내장 처리, 배터리 기반 자체 전력, 저렴한 가격과 같은 공통적인 특성을 가지고 있다 (Spencer et al., 2004). 스마트 센서의 하드웨어는 일반적으로 응답을 계측하기 위한 센서 (sensor), 계측된 응답을 디지털 신호로 변환하기 위한 센싱 인터페이스 (sensing interface), 데이터 무선 전송을 위한 무선 송수신기 (wireless transceiver), 소프트웨어의 내장 및 무선 센서 구동을 위한 마이크로컨트롤러 (microcontroller), 전력 공급을 위한 배터리 등의 부품으로 구성된다. 따라서 스마트 센서를 이용하여 네트워크를 구성할 경우, 각각의 센서노드가 독자적으로 내장된 프로그램을 통해 계측한 데이터를 처리하고, 자체적으로 저장, 해석, 통신을 할 수 있을 뿐만 아니라, 전

1) 학생회원, 울산과학기술대학교 도시환경공학부 학사과정
2) 정회원, 울산과학기술대학교 도시환경공학부 연구교수, 교신저자
3) 정회원, 울산과학기술대학교 도시환경공학부 조교수

* Corresponding author : soojin@unist.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2015년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

력소모를 최소화하기 위한 저전력 기술의 활용이 가능하다 (Spencer et al., 2004).

1998년 교량 상태 평가에 처음 스마트 센서를 도입한 이후, 다양한 스마트 센서 하드웨어/소프트웨어가 개발되었다. 주요 연구방향은 새로운 스마트 센서의 개발과, 개발된 센서 시스템의 성능확인을 위한 실내실험과 소교량의 단기 모니터링 성과를 보고하는 형식으로 주로 진행되었다. 대표적으로, Swartz et al. (2005)는 효율적인 전력 시스템과 넓은 전송범위를 가지며 복잡한 구조적 계산을 할 수 있는 알고리즘을 내장한 Narada 센서를 개발하였으며, Swartz and Lynch (2006)는 실내에서 3층 전단빌딩 모형실험을 수행하여 그 성능을 검증하였다. 이후, Lynch et al. (2009), Kim et al. (2009) 등은 해군 군함과 교량의 안전성을 모니터링 하기 위해 Narada 센서를 이용하였다. 한편, Ruiz-Sandoval et al. (2006)은 UC Berkeley에서 개발된 Berkeley mote에 기반하여 새로운 가속도, 변형률 센서보드를 개발했으며, Nagayama et al. (2007), Rice and Spencer (2008)는 개발된 계산과 통신성능을 강화한 Imote2를 사용하여 무선 센서간의 시간 동기화 기술과 손상 추정 모니터링 기능을 평가하였다.

최근 들어서는 무선 센서 네트워크의 성능향상과 더불어, 이를 실 구조물의 장기적 모니터링에 활용하기 위한 노력이 계속되고 있다. 대표적으로 한국의 KAIST와 미국 UIUC, 일본의 동경대학교는 국제공동연구를 통해 제 2 진도대교에서 70~113개의 대규모 스마트 센서 네트워크를 이용한 장기 모니터링 테스트를 수행하였다 (Cho et al., 2010; Rice et al., 2010; Jang et al., 2010; Spencer and Cho, 2011). 본 진도대교 실험에서는 장기간 SHM 시스템의 운영을 통하여 스마트 센서 네트워크의 구성 및 역할을 달리하며 그 성능을 평가하였을 뿐만 아니라, 계속된 데이터를 이용하여 구조물의 동적 특성과 장력 등의 시스템 특성을 평가하는데 성공하였다. 또한 Ni et al. (2011)은 610m 높이의 Guangzhou Television and Sightseeing Tower (GTST)에서 약 20여 채널의 가속도계를 이용하여 다양한 높이에서 무선 통신을 하며 타워의 진동을 계측하였다. 비록 GTST에는 최종적으로 유선 가속도계가 설치되어 지속적 모니터링을 수행하게 되었지만, 유선과 무선 결과를 성공적으로 비교함으로써 장기적 모니터링에의 활용 가능성을 검증하였다. 이와 같이 최근까지도 스마트 센서를 실제 구조물의 모니터링에 효과적으로 활용하기 위한 다양한 성능향상을 위한 기술개발과 이를 위한 테스트가 계속 보고되고 있다.

Lynch and Loh (2006), Lynch (2007)는 이전까지의 연구

성과들을 종합하여 사회기반시스템의 건전성 모니터링을 위한 스마트 센서의 연구 동향을 정리하였다. Lynch (2007)의 Review 이후 스마트 센서에 관한 많은 연구 성과들과 실 구조물의 적용 사례들이 지속적으로 보고되고 있다. 본 논문에서는 최근 (2010년 이후를 중심으로)에 개발된 스마트 센서의 하드웨어, 소프트웨어, 그리고 응용 사례들을 정리함으로써, 교량 및 구조물의 안전성 평가 및 기타 관련한 분야의 연구자들의 스마트 센서 최신 연구 동향 파악 및 이를 기반으로 한 연구 수행 및 현장 적용에 도움을 주고자 한다.

2. 스마트 센서 하드웨어 개발

최근 스마트 센서 하드웨어 개발은 새로운 기능의 센서 플랫폼의 개발보다는 장기간의 관측과 무선 통신을 위해 효율적인 전력소모의 관리를 위한 하드웨어의 개발, 다양한 물리량을 빠르게 측정하기 위한 센서와 센싱 인터페이스 개발이 상대적으로 활발한 것으로 파악되었다.

2.1 센서와 센싱 인터페이스

구조물 건전성 모니터링 목적으로 보편적으로 사용되는 센서는 가속도계, 변형률계, 변위계이며, 스마트 센서 연구의 초기에서도 이와 같은 물리량을 계측하기 위한 연구가 선행되었다. 최근에는 기존 센서보다 정밀한 센서를 활용하기 위한 하드웨어 개발과, 풍향/풍속, 임피던스, GPS 신호 등 다양한 응답의 계측을 위한 센싱 인터페이스 개발로 그 범위가 확대되고 있다.

Pakzad (2010)는 MICAz mote를 기반으로 동작하는 토목 구조물 계측용 센서 보드를 개발하였다 (Fig. 1(a)). 개발된 센서보드는 4채널의 가속도 데이터와 온도 데이터를 획득할 수 있으며, 획득된 데이터는 anti-aliasing 필터와 16-bit 아날로그 디지털 컨버터 (Analog-to-Digital Converter, ADC)를 통과하여 디지털화된 뒤 MICAz로 보내어진다. 사용된 가속도 센서는 높은 수준의 가속도 계측을 위한 Analog Devices사의 2채널 가속도계 ADXL 202와 낮은 수준의 상시 가속도의 정밀계측을 위한 Silicon Designs사의 SD1221 2개이다. 개발된 센서보드는 진동 테이블에서의 진동 실험에서 기준 가속도계와 거의 일치하는 응답을 계측하였다.

Rice and Spencer (2009)은 Imote2 스마트 센서 플랫폼에서 동작하는 3채널 범용 가속도 센서 보드인 ISM400를 개발하였고 (Fig. 1.(b)), Jo et al. (2013)은 이를 기반으로 SD1221

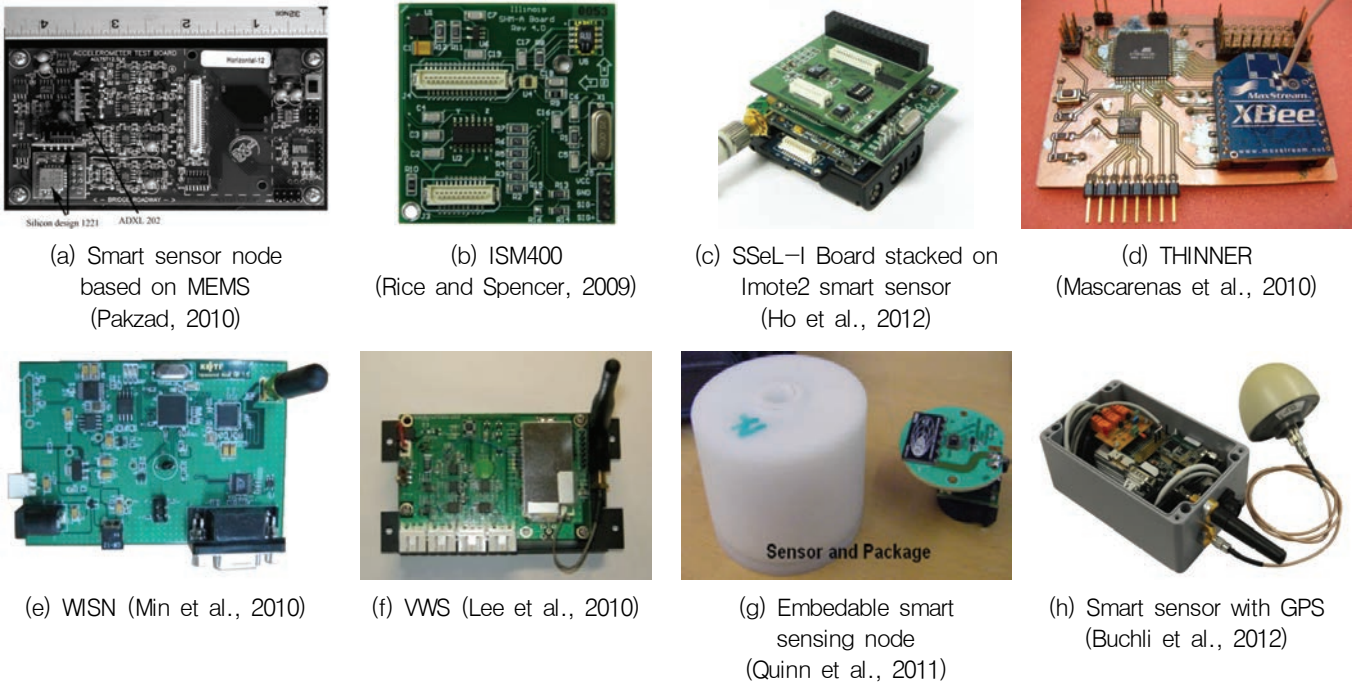


Fig. 1 Sensor and Sensing Interface

을 이용하는 고성능 가속도 센서보드 (SHM-H), 풍향/풍속 센서보드 (SHM-W), 변형률 센서보드 (SHM-S)를 개발하였다. 개발된 센서보드를 통해 가속도, 변형률, 풍향/풍속 등의 다양한 물리량을 계측하여 구조물의 상태를 정밀하게 파악하는 것을 가능하게 한다. SHM-H 센서보드는 ISM400를 목적에 맞게 변형시킨 것으로, ISM400과 동일하게 Quickfilter사의 ADC를 사용한다. 실험을 통해 고주파 계측에서는 ISM400와 SHM-H 센서보드 모두 좋은 성능을 보였지만, 대형구조물의 모드해석 등을 목표로 하는 저주파 계측을 위해서는 고성능인 SHM-H 센서보드만을 사용하거나 SHM-H보드와 기타 보드 (ISM400 등)를 혼용하는 것이 계측 정확도 및 경제성에서 효율적임을 보였다.

Ho et al. (2012) 또한 Imote2 기반 스마트 센서 플랫폼에서 동작하며 임피던스 계측을 수행할 수 있는 센서보드인 SSeL-I 보드 (Fig. 1(c))를 개발하였다. 개발된 SSeL-I 보드는 위의 ISM400과 함께 활용함으로써 구조물의 가속도와 임피던스의 동시 측정이 가능하며, 진동을 이용한 구조물의 전역적 평가와 임피던스를 이용한 국부평가를 함께 수행할 수 있다. 개발된 스마트 센서는 야외에 설치된 소형 캔틸레버 보의 모니터링에 활용되었으며, 야외의 다양한 날씨의 변화와 그에 따른 구조체의 변화를 효과적으로 모니터링 할 수 있음을 보였다.

Mascarenas et al. (2010)은 새로운 두 가지 유형의 SHM

용 스마트 센서 노드를 개발하였다. 첫 번째는 최대 변위의 계측을 위한 커패시턴스 기반의 (capacitance-based) 센서 노드이고, 두 번째는 구조물 손상 탐지를 위한 임피던스 기반의 (impedance-based) 센서 노드이다. 커패시턴스 기반의 스마트 센서 노드인 THINNER (Fig. 1(d))는 커패시턴스 기반 최대변위 측정 장치와 함께 사용함으로써 구조물의 최대 변위를 측정한다. 기존에 많이 사용하는 전압기반의 ADC 대신 CDC (Capacitance-to-Digital Converter)인 Analog Devices사의 AD7745를 사용하였다. THINNER는 배터리 대신에 한 개의 0.1F 용량의 축전지 (supercapacitor)가 연결되어 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)와 같은 모바일 호스트 (mobile host)로부터 전력을 무선으로 공급받아 충전함으로써 지속적 측정을 가능하게 하였다. 한편, 임피던스 기반의 스마트 센서 노드인 WID2 (Wireless Impedance Device)는 이전의 임피던스 기반의 SHM 방법 (Park et al., 2003; Giurgiutiu et al., 2004; Bhalla and Soh, 2004)을 스마트 센서에 접목하기 위하여 개발되었다. Analog Devices사의 AD5933 임피던스 측정 칩은 WID2의 주요 구성요소로써, ADC, DAC (Digital-to-Analog Converter)와 함께 사용되었다. 마이크로컨트롤러는 임피던스 칩으로부터 얻어진 임피던스 데이터를 수집하여 무선으로 전송한다. 1W의 에너지가 모바일 호스트로부터 전송될 때, 0.1F 용량의 축전기를 충전하는데 30-40초가 걸리고, 두 센서 노드 모두 모바일 호스트 기반의 스마트 센서 네트워크

의 사용으로 UAV나 승용차에 장착된 모바일 에이전트에 의해 무선으로 작동 및 데이터 수집이 가능하다.

Min et al. (2010)도 AD5933을 이용한 임피던스 계측용 스마트 센서 WISN (Wireless Impedance Sensor Node, Fig. 1(e))을 개발하였다. WISN도 WID2와 마찬가지로 임피던스 기반의 SHM방법을 내장하여, 자체적으로 손상 검출 및 센서의 손상 탐지 등이 가능하도록 개발되었다. 처리된 데이터는 TI사의 CC2420을 통하여 Zigbee 기반 무선 통신으로 전송된다.

Lee et al. (2010)은 진동현 센서 (vibrating wire sensor)로부터 공진 진동수를 측정하여 무선으로 진동수를 전달 할 수 있는 무선 진동현 기반 변형률 센서를 개발하였다 (Fig. 1(f)). 센서 모듈은 진동하는 현으로부터 공진 진동수를 생성하고 읽을 수 있도록, 진동현 센서 인터페이스, 저역 필터 (low pass filter), ADC로 구성되었다. TI사의 16-bit MSP430 프로세서를 마이크로컨트롤러로 사용하였으며, 400-900MHz 대역의 무선 데이터 통신이 가능한 TI사의 CC1020칩을 사용하였다.

Quinn et al. (2011)은 콘크리트 양생과정 (concrete curing)과 구조물 건전성 모니터링에 모두 활용이 가능한 매립형 스마트 센서 노드를 개발하였다. 매립 시 센서의 보호를 위해 Fig. 1(g)에 보이는 플라스틱 재질의 케이스 내부에 센서를 내장하고, 콘크리트 시편을 이용한 실내 실험을 통해 콘크리트 내 매설형 센서 시스템의 설치 및 콘크리트 밖에 위치한 데이터 획득 시스템으로의 데이터 전송의 효율성을 검증하였다.

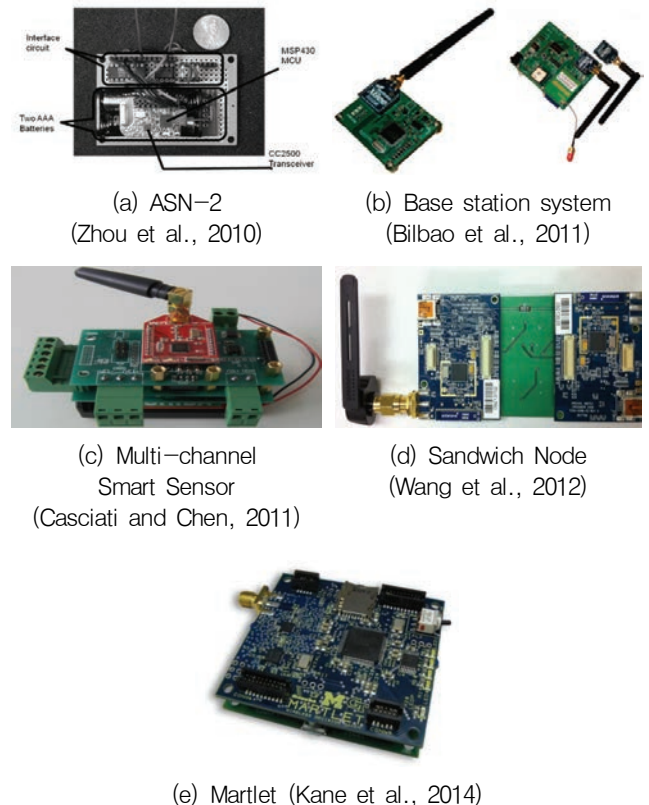
Buchli et al. (2012)은 대형구조물에서 변위를 정확히 계측하기 위해, GPS가 장착된 스마트 센서를 개발하였다 (Fig. 1(h)). 센서 노드는 저전력의 스마트 센서 모듈인 TinyNode184를 기반으로 GPS 수신 모듈인 u-blox사의 LEA-6T를 접목하여 개발하였다. TinyNode184는 MSP430 마이크로컨트롤러와 Semtec사의 SX1221 무선 송/수신기로 구성된다. 센서 노드는 22 mA - 49 mA 사이의 소비 전류를 소모하며, 변위가 크게 나타나는 대형구조물에서 센티미터 이하의 크기를 갖는 다양한 변위 계측에 충분히 활용될 수 있음을 보였다.

2.2 효율적인 전력관리

구조물 건전성 모니터링을 위한 스마트 센서는 일반적으로 내장된 배터리를 통해 전원이 공급되는데, 장기간의 모니터링과 무선 통신을 위해서는 효율적인 전력관리를 필요로

한다. 전력관리를 위한 노력으로는 저전력을 소모하는 스마트 센서 하드웨어의 개발과 에너지 획득 (energy harvesting)을 통한 에너지 공급형 스마트 센서의 개발로 크게 나눌 수 있다.

Zhou et al. (2010)은 임피던스 계측을 위한 저전력 스마트 센서 노드인 ASN-2 (Autonomous SHM Sensor 2)를 개발하였다 (Fig. 2(a)). ASN-2는 사용 전력의 저감을 위하여 저전력 기반인 TI사의 MSP430 마이크로컨트롤러와 TI사의 CC2500 무선 송수신칩을 사용하였으며, 추가적으로 다음의 세 가지 방법을 통하여 소모 전력을 감소하였다. 우선, 전력이 많이 소모되는 무선 전송 시간을 줄이기 위해, 보드 내에서 FFT 및 Peak Picking과 같은 데이터 처리를 모두 수행한 뒤, 그 결과만을 전송하는 것이다. 둘째는 압전센서 가진 신호로서 DAC를 필요로 하는 사인파 대신에 디지털 신호로 바로 공급이 가능한 사각 신호를 사용함으로써, 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하는 DAC 과정에서 소모되는 전력 소모를 줄이는 것이다. 셋째는 계측 시 응답신호의 크기가 아닌 상 (phase)을 감지함으로써, 응답신호의 크기를 디지털화하는 ADC와 FFT 수행을 없애 전력소모를 줄이는 것이다. ASN-2의 전력소모는 비활성 모드에서 0.15mW, 활성 모드에



(e) Martlet (Kane et al., 2014)

Fig. 2 Smart Sensor Platform

서 18mW이며, 이는 2개의 AAA 사이즈의 배터리로 ASN-2를 4시간마다 한 번씩 작동시켰을 때, 2.5년을 사용할 수 있는 수치이다.

Bilbao et al. (2011)은 저전력의 스마트 센서 네트워크를 만들기 위해 PC기반의 기지국을 활용하지 않고, 저전력 네트워크용 기지국과 이를 위한 스마트 센서 노드를 개발하였다 (Fig. 2(b)). 개발된 기지국 노드와 스마트 센서 노드는 TI사의 MSP430 마이크로컨트롤러와 XBee사의 DigiMesh 무선 송수신 모듈을 사용하였다. 센서 노드가 외부 센서와의 인터페이스를 갖는 반면, 기지국 노드는 외부에서 원격으로 데이터에 접속하기 위한 Spreadtrum사의 SM5100-B GPRS (General Packet Radio Service) 모듈과 센서 노드의 정확한 시간 동기화를 위한 SUP500F GPS 모듈을 가지고 있다. 본 기지국 노드는 센서 노드들로부터 데이터를 수집하여 SD카드에 저장하는 저장소 역할을 수행한다. 기지국 노드는 UAV와 같은 모바일 에이전트에 장착이 가능하므로, 이를 통해 전력 소모를 줄일 수 있다.

Jang et al. (2010), Sim et al. (2014)은 Imote2 기반의 스마트 센서 노드에 에너지를 지속적으로 공급하기 위하여, 태양광 발전판을 이용하여 에너지 획득을 수행하였다. 이 에너지 획득 기술은 Cho et al. (2010), Rice et al. (2010), Jang et al. (2010), Spencer and Cho (2011)에서 소개된 제 2 진도대교의 스마트 센서 네트워크를 배터리 교환 없이 지속적으로 사용하기 위하여 개발되었다. Imote2에 내장된 PMIC (Power Management Integrated Circuit)을 이용하여 태양광 발전판으로부터 들어오는 전력을 충전지에 충전하여 사용하였다. 한 달간 본 태양광 기반 에너지 획득 기술을 평가한 결과, 센서의 전압은 센서를 작동시킬 수 있는 최저 전압인 3.6V 밑으로 떨어지지 않으며 일정하게 유지됨으로서, 장기간의 모니터링에 활용이 가능함을 보였다.

위의 연구와 함께 진행된 연구로서, Park et al. (2012)은 Imote2기반의 스마트 센서 노드에 전력을 공급하기 위한 초소형 풍력 발전용 터빈을 개발하였다. 일반적으로 풍력 발전용 터빈에서 가장 중요한 요소는 교류발전기 (alternator)와 날개로 구성되는 회전자로, 본 연구에서는 회전자의 날개의 개수에 따른 풍력기반 에너지 획득 기술의 활용 가능성을 평가하였다. 실험을 통하여 6개의 날개를 가진 풍력 터빈이 가장 효율적이며, 풍속이 강할수록 충분한 전력을 생산함을 보였으며, 이로부터 제 2 진도대교의 풍환경 하에서 센서 네트워크에 지속적으로 에너지 공급이 가능함을 간접적으로 평가하였다.

2.3 스마트 센서 플랫폼 개발

기존의 스마트 센서의 성능을 개선하여 구조물 건전성 모니터링을 진행하는 한편, 최근에는 더욱 효율적이고 정밀한 계측을 위해 새로운 스마트 센서 플랫폼을 개발하려는 노력도 이어지고 있다.

Casciati and Chen (2011)은 TDM (Time Division Multiplexing)과 FDM (Frequency Division Multiplexing)을 기반으로 하는 멀티채널 스마트 센서 플랫폼을 개발하였다 (Fig. 2(c)). 일반적으로 스마트 센서들은 TDM기반의 단일 무선 채널을 활용하는데, 이 경우 대형 센서 네트워크의 구성 시 데이터의 송수신에서 상당 시간의 딜레이가 초래된다. 본 스마트 센서 플랫폼은 TDM과 FDM를 혼합하여 사용함으로써 데이터의 송수신 시간이 네트워크를 구성하는 센서 노드의 수에 무관하다. AD/DA 메인 보드와 TI사의 CC1110 칩, 전원 공급 보드, 필터 보드 등을 포함하는 통합 아키텍처를 사용하였다.

Wang et al. (2012)은 두 개의 Imote2를 결합하여 활용하는 샌드위치 노드 아키텍처 (Fig. 2(d))를 개발하였다. 일반적으로 SHM에 적용되는 스마트 센서 노드는 계측을 수행하지 않는 경우 아이들 (idle) 상태이거나 데이터 전송을 수행 중이며, 이 때 지진과 같은 갑작스러운 이벤트가 발생할 경우 이를 계측하지 못한다. 본 샌드위치 노드 아키텍처는 센서 노드는 제어/통신의 기능을 수행하는 두 개의 Imote2와 계측을 위한 센서 보드로 구성되어 있다. 첫 번째 Imote2는 센서 보드의 제어를 관리하고 보드 내에서 데이터 처리를 수행한다. 두 번째 Imote2는 개발된 샌드위치 노드 커넥터 보드를 통하여 첫 번째 Imote2와 GPIO기반으로 명령이나 데이터를 교환한다. 한 개의 Imote2가 센서보드를 이용하여 일상의 작업 (주기적 계측)을 수행하다가, 지진과 같은 즉각적 이벤트가 관찰될 경우, 다른 한 개의 Imote2가 이를 감지하고, 노드를 이벤트 감지 모드로 변경할 수 있다.

Kane et al. (2014)은 기본적 무선 센서의 기능과 내장연산을 분리하여 수행 가능한 dual-core기반의 새로운 스마트 센서 노드인 Martlet을 개발하였다 (Fig. 2(e)). Martlet은 내부 연산 및 무선 전송 등 스마트 센서의 기본 동작을 수행하는 baseboard와 다양한 물리량 계측, 가진, 프로그래밍 및 디버깅, 필터, 미세 시간 조정 등의 다양한 기능을 부가할 수 있는 wing으로 구성되어 있다. Martlet의 baseboard는 듀얼 코어를 갖는 TI사의 TMS320F28069를 마이크로컨트롤러로 사용하며, TI사의 CC2520 무선 송수신칩을 사용한다. Wing은 baseboard에 연결되어 baseboard의 ADC나 디지털

Table 1 Specification of Smart Sensors

	Pakzad (2010)	Mascarenas et al. (2010)		Lee et al. (2010)	Buchli et al. (2012)	Zhou et al. (2010)	Bilbao et al. (2011)	Casciati and Chen (2011)	Wang et al. (2012)	Kane et al. (2014)
Platform	MICAz mote	THINNER	WID2	-	-	ez430-RF2500	-	Multi-channel smart sensor	Sandwich node	Martlet
Micro-controller	-	ATmega128L	AD5933	TI MSP430	TI MSP430	TI MSP430	TI MSP430	Enhanced 8051 Core	PXA271	TMS320F2806 9 with dual core
External Memory	512 kB flash memory	-	-	2 kB RAM, 256 byte flash memory	8 kB RAM, 92 kB flash memory	-	8 kB RAM, 120 kB flash memory	4 kB internal SRAM	-	-
Wireless Standard	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	UHF	IEEE 802.15.4	-	IEEE 802.15.4	UHF	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4
Radio	CC2420	XBee radio	-	CC1020	SX1211	CC2500	Xbee DigiMesh	CC1110	CC240	CC2520
Power	-	36 mW: measurement 150 mW: data transmission	54 mW: measurement 59.4 mW: data transmission	19.9 mW: receive mode 10-30 mW: transmit mode	54 mA: peak 22-49 mA: current drain	active mode: 18 mW inactive mode: 0.15 mW	3 mA: active mode 120 μA: sleep mode	Voltage: 2.0-3.6 V Current: 200 μ/MHz	-	450 mW: active mode 1 mW: sleep mode
Power Source	four 6V lantern batteries	one 0.1 F capacitor	-	-	-	two AAA-size batteries	-	-	-	-
Communication Range	-	-	-	300m : LOS distance 70m : non-LOS distance	-	less than 20 m outdoors	-	-	-	-
Dimension	115mm×75mm	6cm×4cm	5.5cm×3.7cm	-	60mm×100mm×160mm	60mm×60mm	-	-	-	60mm×60mm

프로토콜을 통해 통신하여 동작한다. Martlet wing의 종류로는 스트레인과 가속도 wing, 냉난방시스템 (hydronics) wing, 환경 계측 wing, 프로그래밍 wing, 실시간 클럭 wing 등이 있다. 추가로 위에서 소개된 스마트 센서들 중 대표적 센서들의 하드웨어의 특징을 Table 1에 비교, 정리하였다.

3. 스마트 센서에 내장된 소프트웨어

스마트 센서의 소프트웨어는 센서 노드를 구동하기 위한 기초인 운영체제와, 그 위에 설치되어 작동하는 각종 애플리케이션 (application), 응용 소프트웨어 그리고 애플리케이션을 서로 연결해주는 중계 소프트웨어인 미들웨어로 크게 나눌 수 있다.

3.1 운영체제 (Operating System)

스마트 센서는 그 목적에 맞는 제한적인 하드웨어를 가지

고 있으므로, 작은 크기의 운영체제 (OS)를 활용함으로써 센서의 리소스 및 전력을 최소한으로 사용하도록 설계된다. 미국 University of California-Berkeley에서 개발된 TinyOS는 저전력의 스마트 센서를 위한 무료 운영체제로서, 현재 스마트 센서 네트워크에서 가장 많이 사용되는 운영체제 중 하나이다. TinyOS는 C와 유사한 NesC를 프로그래밍 언어로 사용하며, 다양한 미들웨어와 소프트웨어 개발 환경을 지원한다 (Kim, 2004). 현재 다양한 스마트 센서들이 TinyOS를 운영체제로 사용하고 있다 (Zonta et al., 2010; Linderman et al., 2010; Dorvash et al., 2010; Buchli et al., 2012).

Lynch et al. (2004)은 자신들이 개발한 스마트 센서 WiMMS (Wireless Modular Monitoring System)에 특화된 운영체제를 개발한 바 있다. 본 운영체제는 C를 기반으로 작성되었으며, 하드웨어 요소를 제어한다. 이를 위하여 시리얼 포트, 무선 모듈, 계측의 제어뿐만 아니라 외부의 인터럽트 (interrupt)에 대하여 실시간으로 ADC를 제어하여 계측을 수행한 뒤 저장하는 역할까지 수행하게 된다. 본 운영체제는 WiMMS

를 개선한 Narada 센서 (Swartz et al., 2005; Kurata et al., 2011; Kane et al., 2014)까지 지속적으로 활용되고 있다.

3.2 임베디드 SHM 애플리케이션

스마트 센서를 SHM 목적으로 사용하기 위하여 다양한 알고리즘을 네트워크상에서 구현하기 위한 연구들이 수행되었다. 스마트 센서는 단순히 계측과 데이터 전송만을 위한 목적으로 사용되는 것이 아니라, 내장된 연산 기능을 이용하여 내부적으로 SHM 알고리즘을 구현함으로써 지능형 센서 네트워크를 구축할 수 있으며, 이를 통해 스마트 센서 이용의 본질적인 목적을 달성할 수 있다.

Dorvash et al. (2010)은 구조물의 가속도 응답을 계측하여 센서 노드 사이의 선형관계를 이용하여 손상을 추정하는 진동기반 손상감지 알고리즘 (Labuz et al., 2010)을 Imote2 기반 스마트 센서에 내장하였다. 알고리즘을 내장한 스마트 센서들을 이용하여 보-기둥 구조물에서 실내실험을 수행하였으며, 스마트 센서 자체적으로 보-기둥 구조물의 손상 위치를 성공적으로 추정할 수 있음을 보였다.

Sim et al. (2010)은 스마트 센서의 그룹화 및 분산연산을 통하여 모드해석을 효율적으로 수행하는 Decentralized Data Aggregation (DDA)을 개발하고, 이를 Imote2 기반의 스마트 센서에 적용하였다. DDA는 센서 네트워크를 일부 센서 노드가 중복 (overlap)되어 있는 계층적인 그룹으로 분류한 뒤, 각 그룹 내부에서 Correlation 또는 Random Decrement 신호로 데이터를 축소한다. 이를 이용하여 각 그룹에 해당하는 국부적인 모드 특성을 자체적으로 계산이 가능하다. 중복된 노드에 해당하는 모드 형상을 이용, 각 그룹의 국부적 모드 특성을 최소 제곱법 (Least Squares Method)을 사용하여 결합함으로써 전체 구조물의 모드 특성을 결정할 수 있다. 3차원의 트러스 모형과 제 2 진도대교 (Spencer and Cho, 2011)에서 내장된 DDA에 의한 모드 해석을 수행함으로써 제안 알고리즘의 효율성을 증명하였다.

Bocca et al. (2011)은 신호에서 다른 진동수의 성분을 확인하여 손상의 존재를 파악하고, 이 과정을 반복적으로 되풀이하여 결과를 갱신함으로써 손상을 추적할 수 있는 Goertzel 알고리즘 (Goertzel, 1958)을 자체적으로 개발한 스마트 센서인 ISMO-2에 내장하였다. 각각의 노드는 각 노드가 모니터링 하고자 하는 진동수를 지속적으로 찾아낸 뒤 그 결과를 내부 네트워크를 통해 공유하고, 이것을 이용하여 각 센서 노드간의 전달율을 계산하여 손상의 존재와 위치를 확인할

수 있게 프로그래밍 되었으며, 실내 트러스 구조물에서의 실험을 통해 손상 탐지 성능을 평가하였다.

Liu et al. (2012)은 Lamb파 기반의 플레이트 손상 탐지를 위하여, 무선 센서 네트워크상에서 Lamb파의 에너지 감쇠 모델과 특이치 분해 (singular value decomposition)를 수행하여 손상 추적을 수행하는 알고리즘을 스마트 센서에 내장하였다. 각 센서 노드는 압전센서로부터 만들어진 Lamb wave 파형을 계측하고 그 에너지를 계산하며, 기지국은 각 센서 노드로부터 수집된 에너지 값을 특이치 분해함으로써 손상의 위치를 파악한다. 약 1m² 크기의 알루미늄 플레이트에 압전센서와 연결된 두 개의 무선 센서를 설치한 뒤, 개발된 소프트웨어를 이용하여 자석을 이용하여 모사한 플레이트의 손상을 성공적으로 탐지하였다.

Peckens and Lynch (2013)는 최소 제곱 분류기 (least square estimator)와 Fisher의 선형 판별식을 Narada 센서노드에 내장하여 해군 전함의 냉각 시스템의 손상 탐지 시스템을 개발하였다. 내장된 분류기 알고리즘의 성능 평가를 위해 해군 전함 냉각 시스템의 모형을 제작한 뒤, 냉각수의 온도와 흐름 등 냉각 시스템에 관한 특징을 계측한 뒤, 이 특징들을 미리 학습시켜놓은 분류기 알고리즘에 대입하여 손상의 위치를 파악하는 시험을 수행하였다. 시험에서는 두 분류기 모두 성공적으로 손상 탐지를 수행하였으며, 특히 Fisher의 선형 판별식이 최소 제곱 분류기보다 더 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다.

Sim et al. (2014)은 Imote2 스마트 센서에 동적응답 기반의 케이블 장력추정기법을 내장하여 자동으로 케이블의 장력을 산정하는 스마트 센서를 개발하였다. 네트워크상의 각 센서 노드는 각각 사장교 케이블에 설치되어 가속도 데이터를 계측하고, 파워 스펙트럼 (power spectrum)을 계산하여 peak-picking 방법으로 고유진동수를 찾아낸다. 이 고유진동수를 Shimada (1994)가 제안한 진동기반 케이블 장력추정 방법에 적용하여 각 케이블의 장력을 추정하고 중앙 컴퓨터에 그 정보를 전달한다. 모든 계산은 각 센서노드 상에서 모두 일어나며, 장력값 전달 및 케이블 운용에 관한 정보만을 위해 무선 통신을 이용하므로 통신 안정성 문제 및 전력소모를 최소화할 수 있다.

3.3 미들웨어 (Middleware)

미들웨어는 운영체제를 초월하여 애플리케이션 소프트웨어에 서비스를 제공하는 소프트웨어를 의미한다. 스마트 센

서의 경우, 애플리케이션이 필요로 하지만 특정 운영체제에서 지원되지 않는 다양한 기능을 갖는 소프트웨어나, 서로 다른 기능을 갖는 센서 노드 사이에서 매개역할을 수행하는 소프트웨어를 의미한다.

미국 일리노이주립대학교 연구팀은 2005년부터 Imote2를 기반으로 스마트 센서 기술을 연구하면서, Imote2 센서 노드를 기반으로 다양한 SHM 애플리케이션을 손쉽게 개발하기 위한 미들웨어 서비스를 오픈소스로 인터넷에서 제공하고 있다 (<http://shm.cs.uiuc.edu>). 본 미들웨어는 안정적인 데이터 전송, 동기화된 계측, 데이터 획득과 같은 스마트 센서의 기본적 동작과 관련된 내용부터 센서의 자가 점검, 멀티홉 (multi-hop), DDA 등 효율적 센서 네트워크 구성, 수치해석을 위한 알고리즘 등 다양한 기능을 제공하고 있다 (Nagayama et al., 2009; Sim et al., 2010; Spencer and Cho, 2011). 본 미들웨어는 현재는 Imote2 기반 스마트 센서를 염두에 두고 제작되었기 때문에 현재는 TinyOS 상에서만 이용이 가능하지만, 간단한 포팅 (porting)만으로 타 운영체제 상에서 손쉽게 활용이 가능하다.

Zonta et al. (2010) 또한 운영체제인 TinyOS 위에서 활용 가능한 미들웨어인 TeenyLIME를 개발하였다. TeenyLIME은 이웃한 이종 노드간의 통신을 가능하게 하며, 효과적으로 이종 센서들을 다루기 위한 데이터 수집 프로토콜을 고안하였다. TeenyLIME은 네트워크의 유연성과 확장성을 향상시키기 위해 멀티홉 (multi-hop) 방식의 활용이 가능하며, 홉 바이 홉 (hop-by-hop) 복원 기법을 이용하여 멀티홉을 통한 무선 통신 도중 발생하는 데이터 손실을 보상한다.

4. 스마트 센서의 성능 테스트

4.1 Laboratory-Scale 성능 테스트

개발된 스마트 센서를 실제 구조물에 적용하기에 앞서, 그 성능을 검증하기 위해 실내 실험을 우선적으로 수행하는 것이 일반적이다. 실내 실험을 통하여, 개발된 스마트 센서의 주요 성능인 계측, 전력 소모, 통신 성능 등을 평가하고, 피드백을 통해 하드웨어/소프트웨어를 수정하게 된다.

Linderman et al. (2010)은 무반향실 (anechoic chamber)에서 Imote2 스마트 센서의 무선 통신 범위 및 통신 품질을 시험하였다. Imote2의 On-board 안테나를 이용하여 테스트를 진행하였고, 이로부터 Imote2 스마트 센서의 무선 통신 특성을 파악하였다. 추가적으로 외부 안테나를 사용할 경우

더 향상된 전송범위와 통신 품질을 얻을 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

Casciati and Chen (2011)은 개발된 멀티채널 플랫폼의 성능을 테스트하기 위해 진동 테이블 위에 설치된 3층의 철골 구조물에서 성능평가를 수행하였다. 철골 구조물의 각 층마다 유선 가속도계를 설치하고, 두 개의 무선 센싱 유닛과 유선 DAQ를 통해 동일한 가속도를 측정하여 그 결과를 비교하였다. 무선 센싱 유닛을 통해 얻어진 데이터는 유선 기반의 데이터와 거의 일치하였으며, DAC의 해상도 차이로 인한 더 부드러운 응답 곡선을 얻을 수 있었다. 또한 다른 기존 무선 시스템과 비교를 통하여, 개발된 멀티채널 시스템이 더 안정적이고, 저렴하며, 전력소비, 통신범위, 데이터 전송률, 데이터 연결 상태에서 적절한 균형을 갖는 시스템임을 강조하였다.

위에서 스마트 센서의 무선 특성 및 주요 성능의 평가를 수행한 것과 더불어, 스마트 센서를 이용한 구조 진동 제어, 손상 추정 등의 SHM을 위한 알고리즘의 구현과 평가를 위한 실험도 다양하게 수행되었다.

Law et al. (2010)은 Narada 스마트 센서를 이용하여 구조물의 분산제어 (decentralized control)를 수행하였다. 이를 위하여 대형 진동대 위에 6층의 철골 구조물을 설치하였다. 구조물의 각 층에는 Narada 스마트 센서와 연동된 속도계와 자기유변감쇠기 (magneto-rheological damper)가 설치되었다. 특히 분산제어 기법의 성능 평가를 위하여, 센서 노드의 오버랩에 따른 두 종류의 분산 제어 방식과 중앙 제어 방식의 비교 검증을 수행하였다. 제어 기법은 모든 방식에 있어 구조물의 응답을 현저히 감소시켰으며, 특히 오버랩을 수행한 분산제어 방식이 중앙제어 방식과 거의 비슷한 응답 감소 성능을 보임을 확인하였다.

Bocca et al. (2011)은 내장된 Goertzel algorithm을 통한 스마트 센서 기반의 손상 탐지를 테스트하기 위해, 나무로 만든 트러스 구조물에서 손상을 추정하는 실내 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 Goertzel algorithm을 사용하여 가속도 데이터를 실시간으로 처리하여 구조물의 손상과 그 위치를 정확하게 추정함을 보였을 뿐만 아니라, 데이터 지연율을 80% 감소시키고 시스템의 수명을 약 52% 증가시켰다.

4.2 실 구조물에서의 성능 테스트

실제 구조물에 무선 스마트 센서 네트워크를 구축하는 것은 기존의 와이어 센서 방식에서의 접근의 한계점을 극복하

고 비용을 절감할 수 있다. 현재까지 많은 스마트 센서가 개발되었으며, 실 구조물에서 성능검증을 위한 실험을 수행한 사례도 늘어나고 있는 추세이다. 그러나 아직까지 장기 모니터링 목적으로 스마트 센서를 사용한 예는 많지 않으며, 이는 주로 전력공급 방식 및 센서 하드웨어의 내구성에 대한 염려에서 기인한다.

Kurata et al. (2010)은 교량의 진동을 측정하기 위해 캘리포니아의 New Carquinez Bridge (NCB)에 2주 동안 총 15개의 가속도계가 부착된 Narada 센서를 주감판과 주탑에 설치하였다. 700m까지의 통신범위에서 99%의 송수신율을 보였고 교량의 가속도 응답 데이터는 바람과 차량 등에 의해 받는 영향과 정확하게 일치하였다. Pakzad (2010)은 64개의 제작된 MEMS 기반의 무선 센서를 금문교 (Golden Gate Bridge)에 부착하여 석 달 이상 측정하였다. 모드 형상과 이것의 95%의 신뢰구간은 유한요소모델을 이용하여 추정된 모드형상과 대부분 일치하였다.

Cho et al. (2010), Rice et al. (2010), Jang et al. (2010)은 장기간 SHM 시스템으로써 무선 스마트 센서 시스템의 성능을 테스트하기 위해 총 70개의 센서를 제 2 진도대교에 설치하였다. 전송 범위가 제한되기 때문에, 70개의 센서를 두 그룹으로 나누어 각각 상응하는 통신 기지국의 제어를 받게 하였다. 모드해석은 측정된 가속도 데이터를 사용하여 수행하였고, 교량의 FE 모델과 거의 일치함을 보였다. 또한, 전원 공급용으로써 작은 풍력발전용 터빈의 가능성 또한 입증되었다.

Nguyen et al. (2013)과 Torbol et al. (2013)은 각각 Imote2 기반의 스마트 센서와 DuraMote 기반의 스마트 센서 시스템을 개통 전의 사장교인 화명대교에 설치하고 한 달 이상의 기간 동안 교량의 동특성 및 케이블의 장력을 모니터링 하였다. 또한 장기간 동안 스마트 센서의 내구성 및 안정성을 직접적으로 평가하였다.

이 외에도 중소규모 교량의 모니터링에 다양한 스마트 센서들이 사용되었다. Kim et al. (2010), Kim and Lynch (2012)는 재구성 가능한 (reconfigurable) 무선 모니터링 시스템의 유용성과 차량-교량 상호작용 (vehicle-bridge interaction)의 직접적 파악 가능성을 검증하기 위하여, 강상자형 교량인 연대교에서 Narada 스마트 센서를 이용한 시험을 수행하였다. 특히 2012년 연구에서는 스마트 센서를 교량과 채하 트럭에 모두 설치하고 재하시험을 수행하여, 트럭의 응답과 교량의 가속도 응답의 관계를 분석하였다. Narada 센서 노드는 두 시험 모두에서 거의 100%의 송수신율로 동작하여 충분한

현장 활용성을 증명하였다.

Mascarenas et al. (2010)은 새롭게 개발된 커패시턴스 기반의 무선 센서 Thinner와 임피던스 기반의 무선 센서 WID2의 성능평가를 위하여, New Mexico에 위치한 Alamosa Canyon Bridge에서 재하시험을 수행하였다. 22톤의 덤프트럭이 35km/h의 속력으로 교량을 지나갈 때 THINNER를 이용하여 최대 변위를 측정하였다. 본 실험에서 THINNER는 기존의 포일 스트레인 게이지와 비교하여 그 정확성을 검증하였을 뿐 아니라 모바일 호스트 기반의 무선 센서 네트워크의 가능성을 증명하였다. 또한 교량의 볼트풀림 모니터링을 위하여 세 개의 WID2 센서노드를 설치하고 계측을 수행하였다. 모바일 호스트에 의한 센서 노드의 동작 및 데이터 수집은 성공적이며, 세 개의 센서노드는 구조물 상태의 빠른 진단에 적합한 여러 응답을 효과적으로 모니터링 하였다.

Ni et al. (2011)은 건설 중인 610m 높이의 Guangzhou New TV Tower에 Tokyo Sokushin 사의 AS-2000C 가속도계를 20채널 설치한 뒤, 가속도 신호를 WiMMS (Lynch et al. 2004)를 이용하여 무선으로 전송하는 모니터링 시스템을 설치하고 타워의 진동을 모니터링 하였다. 계측된 가속도는 비록 일부에서 유선으로 계측된 가속도 데이터에 비해 노이즈가 심한 것으로 나타났으나, 모드 해석을 통하여 정확한 타워의 동특성은 얻어내었다. 이 실험을 통하여 무선 계측기술이 낮은 진동수나 작은 진폭의 초고층 구조물의 진동 모니터링 시 충분히 신뢰할 수 있는 결과를 보인다는 것을 증명하였다.

Park et al. (2013)은 서울의 동대문 디자인 플라자에 건설 단계부터 13개월동안 체계적인 스마트 센서 기반 SHM 시스템을 설치하고, 변형률, 기울기, 변위 등 주요 응답을 모니터링하였다. 건설 현장에서 설치 및 유지관리가 쉽지 않은 케이블의 사용을 대폭 줄이기 위하여, 에너지 효율적인 무선 계측 유닛과 상용 센서들을 접목하여 계측시스템을 구성하였다. 장기간의 모니터링을 통하여 건설 중인 비정형 빌딩의 실시간의 자동화된 모니터링이 가능함을 보였고, 주요 구조부재 각각의 처짐, 변형률, 기울기 등의 응답의 계측을 통한 구조물의 거동 및 안전성 평가를 성공적으로 수행하였다.

5. 결론

본 논문에서는 최근 사회기반시스템의 건전성 모니터링을 위한 스마트 센서와 센서 네트워크 관련 연구동향에 대해 소개하였다. 스마트 센서가 교량 상태 평가에 처음 도입된 1998년부터 현재까지 효율성과 경제성을 위한 새로운 스마트 센

서를 개발하려는 노력이 이어지고 있고, 실 구조물에서 개발된 센서 시스템의 성능을 확인하고 이를 실제로 사용하기 위한 다양한 노력이 이어지고 있다. 본 논문은 스마트 센서의 하드웨어 개발, 센서에 내장된 소프트웨어, 개발된 스마트 센서의 성능 테스트로 나누어 최신 연구동향을 소개하였다. 하드웨어 쪽에서는 다양한 계측을 위한 센싱 및 센싱 인터페이스 개발, 새로운 형식의 스마트 센서 플랫폼 개발, 전력 소모를 줄이기 위한 하드웨어 개발과 관련한 연구가 주로 진행되고 있다. 최신 개발된 소프트웨어는 스마트 센서 동작의 기본이 되는 운영체제와, 그 위에 놓이는 무선 통신을 위한 소프트웨어 및 SHM을 위한 알고리즘으로 나누어 설명하였다. 스마트 센서의 성능 테스트는 실험실 스케일의 테스트와 실 구조물에서의 테스트에서 다양하게 진행되고 있으며, 이를 통하여 개발된 스마트 센서의 효율성을 증명하고, 교량 및 초고층 구조물과 같은 실 구조물에서 그 안전 상태를 진단하는 단계에 이르렀다. 본 연구동향을 통하여 현재 스마트 센서 및 센서 네트워크 기술 개발이 연구실 수준의 연구를 넘어서서, 실제 기존의 유선 센서 기반의 계측 방식을 대체하고 더욱 향상된 구조물 건전성 모니터링 시스템의 구축에 활용될 수 있음을 알 수 있다.

이와 같은 활발한 스마트 센서 기술의 연구에도 불구하고, 위에서 언급한 스마트 센서 플랫폼들이 주로 연구기관 및 학교를 중심으로 개발됨으로 인하여, 외부 환경에 대한 하드웨어의 내구성, 소프트웨어의 GUI (Graphic User Interface)와 같은 편의성과 관련한 기술 개발이 미흡한 점은 일반 토목기술자들이 스마트 센서 기술을 널리 사용하지 못하게 하는 큰 장벽으로 남아있다. 또한 배터리 기술 개발이 기타 하드웨어 기술 개발 속도를 따라잡지 못하여 발생하는 간극 또한 무선 센서 기술을 기반으로 운용되는 스마트 센서 기술의 확산을 가로막는 큰 요인이기도 하다. 이러한 한계점은 향후 기술의 안정성 및 실용성 향상을 위한 여러 연구기관의 지속적 연구 및 산학의 적극적 협업을 통하여 극복해야 할 점으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술 연구사업의 연구비지원 (14SCIP-B065985-02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Bhalla, S., and Soh, C. K. (2004), High frequency piezoelectric

signatures for diagnosis of seismic/blast induced structural damages, *Ndt & E International*, 37(1), 23-33.

2. Bilbao, A., Hoover, D., Rice, J., and Chapman, J. (2011), Ultra-low power wireless sensing for long-term structural health monitoring, *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics, 798109-1-798109-14.

3. Bocca, M., Toivola, J., Eriksson, L. M., Hollmén, J., & Koivo, H. (2011), Structural health monitoring in wireless sensor networks by the embedded Goertzel algorithm, *Proceedings of the 2011 IEEE/ACM Second International Conference on Cyber-Physical Systems*, IEEE Computer Society, 206-214.

4. Buchli, B., Sutton, F., and Beutel, J. (2012), GPS-equipped wireless sensor network node for high-accuracy positioning applications, *Wireless Sensor Networks*, Springer Berlin Heidelberg, 179-195.

5. Casciati, S., and Chen, Z. (2011), A multi-channel wireless connection system for structural health monitoring applications, *Structural Control and Health Monitoring*, 18(5), 588-600.

6. Cho, S., Jo, H., Jang, S., Park, J., Jung, H. J., Yun, C. B., Spencer Jr, B. F., and Seo, J. W. (2010), Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using wireless smart sensor technology: data analyses, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 461-480.

7. Dorvasha, S., Pakzada, S. N., Labuza, E., Changa, M., Lib, X., and Chengb, L. (2010), Validation of a wireless sensor network using local damage detection algorithm for beam-column connections, *Proceedings of SPIE*, 7467, 764719-1-764719-11.

8. Giurgiutiu, V., Zagrai, A., and Bao, J. (2004), Damage identification in aging aircraft structures with piezoelectric wafer active sensors, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15(9-10), 673-687.

9. Goertzel, G. (1958), An algorithm for the evaluation of finite trigonometric series, *American mathematical monthly*, 65(1), 34-35.

10. Ho, D. D., Nguyen, K. D., Yoon, H. S., and Kim, J. T. (2012), Multiscale acceleration-dynamic strain-impedance sensor system for structural health monitoring, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 1-17.

11. Jang, S., Jo, H., Cho, S., Mechitov, K., Rice, J. A., Sim, S. H., Jung, H. J., Yun, C. B., Spencer Jr, B. F., and Agha, G. (2010), Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 439-459.

12. Jo, H., Park, J. W., Spencer Jr, B. F., and Jung, H. J. (2013), Development of high-sensitivity wireless strain sensor for structural health monitoring, *Smart Structures and Systems*, 11(5), 477-496.

13. Kane, M., Zhu, D., Hirose, M., Dong, X., Winter, B., Häckell, M., Lynch, J. P., Wang, Y., and Swartz, R. A. (2014), Development of an extensible dual-core wireless sensing node for cyber-physical systems, *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics, 90611U-1-90611U-19.

14. Kim, D. Y., Yang, J. Y., Lee, I. S., Yoo, S. E., Seong, J.

- U., Lopez, T. S., and Do, Y. M. (2004), Embedded software technology for wireless sensor network, *The Magazine of the IEKK*, 31(11), 84-98.
15. Kim, J. H., Lynch, J. P., Zonta, D., Yun, C. B., and Lee, J. J. (2009). Modal analysis of the Yeondae Bridge using a reconfigurable wireless monitoring system, *Proceedings of the 10th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR'09)*, Osaka, Japan.
 16. Kim, J., and Lynch, J. P. (2012), Experimental analysis of vehicle-bridge interaction using a wireless monitoring system and a two-stage system identification technique, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, 3-19.
 17. Kim, J., Swartz, A., Lynch, J. P., Lee, J. J., and Lee, C. G. (2010), Rapid-to-deploy reconfigurable wireless structural monitoring systems using extended-range wireless sensors, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 505-524.
 18. Kurata, M., Kim, J., Zhang, Y., Lynch, J. P., Van der Linden, G. W., Jacob, V., Thometz, E., Hipley, P., and Sheng, L. H. (2011). Long-term assessment of an autonomous wireless structural health monitoring system at the new Carquinez Suspension Bridge, *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics, 798312-798312.
 19. Kurata, M., Lynch, J. P., van der Linden, G. W., Jacob, V., and Hipley, P. (2010), Preliminary study of a wireless structural monitoring system for the new carquinez suspension bridge, *Proceedings of the Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring*, 1-14.
 20. Labuz, E. L., Chang, M., and Pakzad, S. (2010), Local damage detection in beam-column connections using a dense sensor network, *Proceedings of 19th Annual Structures Congress*, Orlando, FL, 3143-3154.
 21. Law, K. H., Wang, Y., Swartz, A., and Lynch, J. P. (2010), Wireless sensing and vibration control of civil structures, *Proceedings of Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) 2010*, IEEE International Conference, 1-4.
 22. Lee, H. M., Kim, J. M., Sho, K., & Park, H. S. (2010). A wireless vibrating wire sensor node for continuous structural health monitoring, *Smart Materials and Structures*, 19(5), 055004.
 23. Linderman, L. E., Rice, J. A., Barot, S., Spencer Jr, B. F., and Bernhard, J. T. (2010), Characterization of wireless smart sensor performance, *Journal of engineering mechanics*, 136(12), 1435-1443.
 24. Liu, L., Liu, S., and Yuan, F. G. (2012), Damage localization using a power-efficient distributed on-board signal processing algorithm in a wireless sensor network, *Smart Materials and Structures*, 21(2), 025005.
 25. Lynch, J. P. (2007), An overview of wireless structural health monitoring for civil structures, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 345-372.
 26. Lynch, J. P., and Loh, K. J. (2006), A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring, *Shock and Vibration Digest*, 38(2), 91-130.
 27. Lynch, J. P., Law, K. H., Kiremidjian, A. S., Carryer, E., Farrar, C. R., Sohn, H., Allen, D. W., Nadler, B., and Wait, J. R. (2004), Design and performance validation of a wireless sensing unit for structural monitoring applications, *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3-4), 393-408.
 28. Lynch, J. P., Swartz, R. A., Zimmerman, A. T., Brady, T. F., Rosario, J., Salvino, L. W., and Law, K. H. (2009), Monitoring of a high speed naval vessel using a wireless hull monitoring system, *Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring*, 9-11.
 29. Mascarenas, D. D., Flynn, E. B., Todd, M. D., Overly, T. G., Farinholt, K. M., Park, G., and Farrar, C. R. (2010), Development of capacitance-based and impedance-based wireless sensors and sensor nodes for structural health monitoring applications, *Journal of Sound and Vibration*, 329(12), 2410-2420.
 30. Min, J., Park, S., Yun, C. B., and Song, B. (2010) Development of a low-cost multifunctional wireless impedance sensor node, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 689-709.
 31. Nagayama, T., Sim, S. H., Miyamori, Y., and Spencer Jr, B. F. (2007), Issues in structural health monitoring employing smart sensors, *Smart Structures and Systems*, 3(3), 299-320.
 32. Nagayama, T., Spencer Jr, B. F., Mechitov, K. A., and Agha, G. A. (2009), Middleware services for structural health monitoring using smart sensors, *Smart Structures and Systems*, 5(2), 119-137.
 33. Nguyen, K. D., Kim, J. T., and Park, Y. H. (2013), Long-term vibration monitoring of cable-stayed bridge using wireless sensor network, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 1-9.
 34. Ni, Y. Q., Li, B., Lam, K. H., Zhu, D., Wang, Y., Lynch, J. P., and Law, K. H. (2011), In-construction vibration monitoring of a super-tall structure using a long-range wireless sensing system, *Smart Structures and Systems*, 7(2), 83-102.
 35. Pakzad, S. N. (2010), Development and deployment of large scale wireless sensor network on a long-span bridge, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 525-543.
 36. Park, G., Sohn, H., Farrar, C. R., and Inman, D. J. (2003), Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward, *Shock and Vibration Digest*, 35(6), 451-464.
 37. Park, H. S., Shin, Y., Choi, S. W., and Kim, Y. (2013), An integrative structural health monitoring system for the local/global responses of a large-scale irregular building under construction. *Sensors*, 13(7), 9085-9103.
 38. Park, J. W., Jung, H. J., Jo, H., and Spencer, B. F. (2012), Feasibility study of micro-wind turbines for powering wireless sensors on a cable-stayed bridge, *Energies*, 5(9), 3450-3464.
 39. Peckens, C. A., and Lynch, J. P. (2013), Embedded linear classifiers on wireless sensor networks for damage detection, *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics, 86920V-1-86920V-10.
 40. Quinn, W., Angove, P., Buckley, J., Barrett, J., and Kelly, G. (2011), Design and performance analysis of an embedded wireless sensor for monitoring concrete curing and structural health, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 1(1-2), 47-59.
 41. Rice, J. A., and Spencer Jr, B. F. (2008), Structural health monitoring sensor development for the Imote2 platform,

- Proceedings of In The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics, 693234-693234.
42. Rice, J. A., and Spencer Jr, B. F. (2009), Flexible smart sensor framework for autonomous full-scale structural health monitoring, Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series 018, University of Illinois at Urbana-Champaign. <http://hdl.handle.net/2142/16300>.
 43. Rice, J. A., Mechitov, K., Sim, S. H., Nagayama, T., Jang, S., Kim, R., Spencer Jr, B. F., Agha, G., and Fujino, Y. (2010), Flexible smart sensor framework for autonomous structural health monitoring, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 423-438.
 44. Ruiz-Sandoval, M., Nagayama, T., and Spencer Jr, B. F. (2006), Sensor development using Berkeley Mote platform, *Journal of Earthquake Engineering*, 10(2), 289-309.
 45. Shimada, T. (1994), Estimating method of cable tension from natural frequency of high mode, *Proceedings of JSCE*, 501(1-29), 163-171.
 46. 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.
 47. Sim, S. H., Spencer, B. F., Zhang, M., and Xie, H. (2010), Automated decentralized modal analysis using smart sensors, *Structural Control and Health Monitoring*, 17(8), 872-894.
 48. 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.
 49. Spencer, Jr. B. F., and Cho, S. (2011), Wireless smart sensor technology for monitoring civil infrastructure: technological developments and full-scale applications, *Proceedings of 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM11+)*, Technopress, Seoul, Korea.
 50. Straser, E. G., and Kiremidjian, A. S. (1998), A modular, wireless damage monitoring system for structures. Stanford, CA, USA: John A. Blume Earthquake Engineering Center.
 51. Swartz, R. A., and Lynch, J. P. (2006), A multirate recursive ARX algorithm for energy efficient wireless structural monitoring, *Proceedings of 4th World Conference on Structural Control and Monitoring*, San Diego, CA, USA.
 52. Swartz, R. A., Jung, D., Lynch, J. P., Wang, Y., Shi, D., and Flynn, M. P. (2005), Design of a wireless sensor for scalable distributed in-network computation in a structural health monitoring system, *Proceedings of 5th international workshop on structural health monitoring*, Stanford, CA, USA, 1570-1577.
 53. Torbol, M., Kim, S., and Shinozuka, M. (2013), Long term monitoring of a cable-stayed bridge using DuraMote, *Smart Structures and Systems*, 11(5), 453-476.
 54. Wang, Z., Pakzad, S., and Cheng, L. (2012), Sandwich node architecture for agile wireless sensor networks for real-time structural health monitoring applications, *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics, 83450L-1-83450L-8.
 55. Zhou, D., Ha, D. S., and Inman, D. J. (2010), Ultra low-power active wireless sensor for structural health monitoring, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 675-687.
 56. Zonta, D., Wu, H., Pozzi, M., Zanon, P., Ceriotti, M., Mottola, L., Picco, G. P., Murphy, A. L., Guna, S., and Corra, M. (2010), Wireless sensor networks for permanent health monitoring of historic buildings, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 595-618.

Received : 03/03/2015
 Revised : 04/06/2015
 Accepted : 04/13/2015

요 지

구조물 건전성 모니터링은 센서로부터 구조물의 응답을 수집하고 분석하여 구조물의 정확한 상태를 진단하는 기술이다. 최근 노후화된 구조물의 증가로 인하여, 지속가능한 사회 발전을 위해 더욱 발달된 구조물 건전성 모니터링 기술이 요구되고 있다. 최신 구조물 건전성 모니터링 기술 중 하나인 무선 스마트 센서와 센서 네트워크 기술은 기존의 유선 방식의 모니터링 시스템과 비교하여 더욱 효율적이며 경제적인 모니터링 시스템의 구축을 가능하게 하는 기술이다. 최근까지도 관련 연구자들은 스마트 센서의 성능 및 확장성 향상을 위하여 연구개발을 진행하고, 다양한 실내, 실외 실험을 통한 성능 테스트를 진행하였다. 본 논문에서는 최근 (2010년 이후를 중심으로)에 개발된 스마트 센서의 하드웨어, 소프트웨어, 그리고 응용 사례들을 정리함으로써, 구조물 건전성 모니터링을 위한 스마트 센서의 최신 연구동향에 대해 소개하고자 한다.

핵심 용어 : 스마트 센서, 구조물 건전성 모니터링