

무선 센싱 기술을 이용한 사회기반시설물 및 건축물의 구조 반응 자동 모니터링

Structural Response Monitoring for Civil Infra-structures and Buildings using Wireless Sensing Technology



최 세 운*
Choi, Se-Woon



박 효 선**
Park, Hyo-Seon



김 유 석***
Kim, You-Sok



김 종 문****
Kim, Jong-Moon

1. 개 요

성수대교 붕괴사고 (1994), 삼풍백화점 붕괴사고 (1995) 등과 같이 막대한 인적, 물적 피해를 발생시킨 대형 사고를 경험하면서 사회시설물 및 건물의 안전관리에 관한 중요성 및 관심이 증가하게 되었다. 그러나 사고가 발생한지 20여년이 지난 현재까지도 마우나오션 리조트 붕괴사고 (2014), 잠실 싱크홀 (2014) 등과 같은 피해 사례가 빈번하게 발생하고 있다.

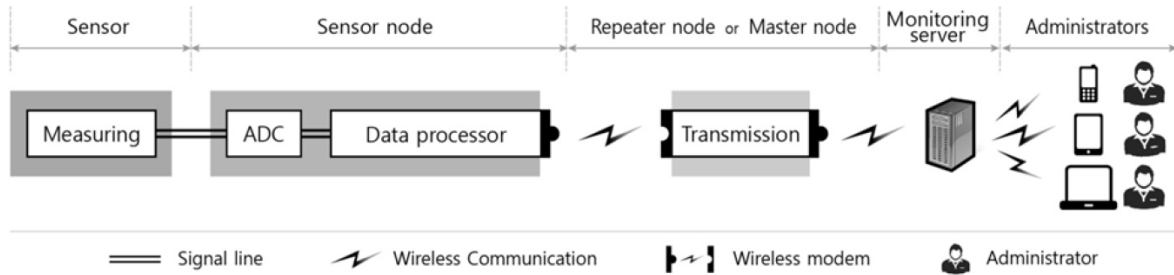
이러한 피해를 감소시키고 문제를 해결하기 위해 현장에 적용 가능하고 효율성 및 경제성을 가진 구조물 건전도 모니터링(Structural health monitoring, SHM) 기술 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고

있다 (Brownjohn, 2007; Chang et al., 2008; Sohn et al., 2004; Lynch and Loh, 2006; Ko and Ni, 2005; Fan and Qiao, 2011; Park et al., 2013; Choi et al., 2013).

SHM은 센서를 이용하여 구조물의 반응을 계측하고, 이를 분석 및 진단하여 구조물의 건전도를 평가한 후 평가결과에 따라 보수, 보강 등과 같은 적절한 조치를 취하도록 하는 범위를 가진다.

SHM에 관한 기존 연구는 1) 기존 센서 (가속도계, 변형률계, 변위계 등)를 이용한 구조물의 반응 예측, 안전도평가, 손상평가 등에 관한 기술 개발 2) 기존 센서의 정확성, 적용성 등을 향상시키기 위한 첨단 센서 개발 및 평가기법 개발, 3) 첨단 통신 기술을 이용한 무선 자동 계측 기술 개발 등을 포괄하고 있다. 이러한 SHM 기술은 현재 시뮬레이션 혹은 실험을 통해 검증되는 수준이며 실제 구조물에 적용되어 검증된 사례는 드문 실정이다.

* 대구가톨릭대학교 건축학부 조교수
** 연세대학교 건축공학과 교수
*** 연세대학교 건축구조헬스케어연구단 연구교수
**** ㈜디에스텍 대표이사



〈Fig. 1〉 Components of the wireless sensor network (Park et al., 2013)

SHM 기술이 실제 구조물에 적용된 사례는 사회 기반시설물 및 대형 건물 등이 있다. 사회기반시설물 (교량, 터널, 도로 등)과 대형 건물 (공연장, 전시장, 경기장, 고층건물 등)은 다수의 사람이 여가, 경제 등을 목적으로 다양한 활동을 할 수 있도록 하는 기능을 제공하기 때문에 이들에 대한 안전유지 관리 필요성이 요구되어 우선적으로 이들 구조물에 적용된 것으로 사료된다. 즉, SHM 기술은 구조물의 중요성과 붕괴시 파급효과, 상징성 등을 고려하여 시험적으로 몇몇 사회기반시설물 및 대형 건물에 적용되고 있는 초기 단계이며, 이것이 보편화되기 위해서는 법적인 제도가 마련되고 SHM 기술의 정확성, 적용성, 경제성 등이 향상될 필요가 있다.

실 사회기반시설물 및 건물의 SHM을 하기 위해서는 계측된 구조반응을 이용해 정확한 분석 및 손상 평가 기술이 요구될 뿐 아니라 계측의 편이성, 신속한 분석, 계측시스템의 경제적인 유지관리 비용 등에 관한 요소가 더불어 고려되어야 한다. 이를 위해 실시간으로 구조반응을 자동 계측 및 수집할 수 있는 무선계측시스템에 관한 연구가 이루어지고 있다. 무선계측시스템은 케이블로 인한 시공 작업의 방해를 줄이고, 계측 및 수집 과정을 자동화 할 수 있는 이점을 가진다. 이는 원거리에 위치한 구조물을 주기적으로 방문하는 횟수를 줄일 수 있으며, 접근성이 떨어지는 부재의 모니터링 용이성을 높여 주는 효과를 가진다. 또한 자동화를 통해 인력 비용을 감소시켜 설치 이후의 유지관리 비용을 줄일 수 있다.

본 기사에서는 사회기반시설물 및 건물의 SHM에 적용할 수 있는 실용적인 무선계측시스템 및 적용 사례를 소개하고자 한다.

2. 무선계측시스템

2.1 구성요소

본 기사에서 소개하는 무선계측시스템은 〈Fig. 1〉과 같이 센서, 무선센서노드(센서노드, 리피터노드, 마스터노드), 모니터링 서버 등으로 구성된다.

2.2 센서

구조물의 구조반응을 계측하기 위해서 구조물에는 센서가 설치되어야 한다. 계측하고자 하는 구조반응의 종류에 따라 다양한 센서(변형률계, 가속도계, 변위계 등)가 설치될 수 있다. 소개되는 무선센서노드에는 모든 센서가 자유롭게 연결되는 것은 아니며 현재 진동형 기반의 변형률계, MEMS형 경사계, 레이저 변위계, 진동형 기반의 로드셀 등이 연결될 수 있다.

2.3 무선센서노드

무선센서노드에는 〈Fig. 2〉와 같이 1) 센서노드, 2) 마스터노드, 3) 리피터 노드 등으로 구분된다.

센서노드는 센서 처리 모듈, 무선 통신 모듈, 프로세서 및 절전회로 등으로 구성된다. 센서 처리 모듈은 유선으로 연결된 센서를 작동시켜 구조반응을 계측하도록 한다. 무선 통신 모듈은 센서 처리 모듈



(a) Sensor node



(b) Master node



(c) Repeater node

〈Fig. 2〉 Wireless sensing units
(<http://www.dstek.biz/>)

에 의해 측정된 구조반응값을 무선으로 송신하는 역할을 수행한다. 소개하는 센서노드의 무선 통신 모듈에서는 장애물에 대한 회절성이 좋고, 전력 소모가 적고, 전파 간섭의 영향이 작은 Industrial Scientific and Medical (ISM) 대역의 424MHz 극초 단파를 사용한다. 한편, 프로세서는 내장된 메모리의 프로그램에 따라서 무선센서노드의 동작을 제어하여 소비 전류를 최소화하는 기능을 한다. 즉, 프로세서에 있는 타이머에 의해 동작(Action) 모드와 슬립(Sleep) 모드가 반복된다. 동작모드에서는 센서 값을 측정하고, 무선 통신 장치를 이용하여 마스터 노드 혹은 리피터 노드에 측정된 값을 전달하게 된다. 이후 무선 센서 노드는 슬립 모드가 되어 전원이 최대 절전 모드가 된다. 이러한 절전 모드는 전력소모를 최소화하여 실 구조물의 적용성을 극대화 하는데 기여한다.

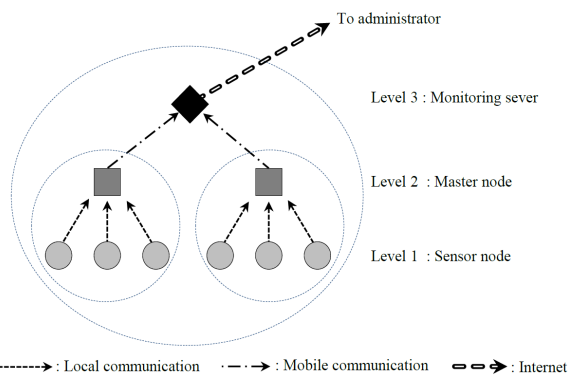
통신 거리 및 장애물의 한계, 전력 소비 문제 등을 해결하기 위해 소개하는 무선계측시스템은 〈Fig. 3〉과 같은 일방형의 계층형(Tree topology) 무선 통신 형태를 가진다.

마스터노드는 근거리 무선 통신 장치(ISM 대역의 소출력 무선 모듈)와 원거리 통신 장치 (Code Division Multiple Access, CDMA)로 이루어져 있다. 이는 다수의 센서노드로부터 근거리 통신을 이용해 측정값을 받아 원거리에 위치한 서버로 원거리 통신을 이용하여 수집된 데이터를 전달하는 기능을 한다.

리피터노드는 근거리 무선 통신 장치로만 구성되어 있어서, 센서노드와 마스터노드 간의 거리가 멀거나 벽과 같은 장애요소로 인해 통신이 되지 않는 경우에 사용한다.

2.4 모니터링 서버 및 소프트웨어

현장에 설치된 센서로부터 측정된 모든 데이터는 마스터노드를 통해 서버에서 수집된다. 이 서버는 현장에 위치할 수도 있으며, 현장 밖에 위치하여 다



〈Fig. 3〉 System topology of wireless sensor network (Choi et al., 2013)



〈Fig. 4〉 Web-based managing program (Park et al., 2013)

수의 현장에서 계측된 데이터를 동시에 수신하고 관리할 수 있다.

서버는 데이터 수신부, 데이터베이스, 상황인식 모듈 등으로 구성된다. 데이터 수신부는 CDMA 모뎀을 통해 마스터 노드가 송신한 데이터를 수신하고 이를 데이터베이스에 전달하는 역할을 한다.

데이터베이스는 수신된 데이터뿐 아니라 웹-기반 관리 프로그램에서 운영되는 모든 정보가 저장되는 곳이다. 그리고 데이터 저장 및 프로그램 운영과 관련된 각종 내장 프로시저가 등록된 곳이다. 이를 통해 관리프로그램에서 데이터를 조회할 수 있으며, 데이터 수신부에서 수신된 데이터를 데이터의 형태에 맞게 저장 및 관리할 수 있도록 한다.

상황인식모듈은 수신된 데이터를 주기적으로 분석하여, 구조물의 위험 여부를 판단하게 된다. 만약 계측된 구조반응이 사전에 설정된 허용치보다 클 경우, SMS, 이메일 등을 통해 메시지를 발송하는 기능을 가진다. 또한 상황인식모듈은 센서 및 무선 센서노드의 상태에 대한 주기적 분석 및 알림 기능이 있어서, 이에 대한 신속한 대처가 이루어지도록 한다.

서버는 〈Fig. 4〉와 같이 웹-기반의 관리프로그램을 통해 언제, 어디서든 접속하여, 현장의 상황을

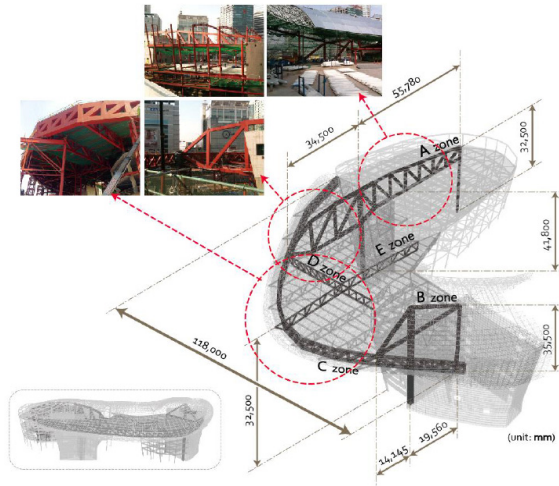
실시간으로 확인할 수 있다. 이는 서버에 수신된 데이터를 온라인으로 직접 접근할 수 있어서 별도의 작업 없이 실시간으로 현장 상황을 파악할 수 있다. 그리고 이는 현장 관리의 편의성을 위해 동일한 무선 센서 시스템이 설치된 여러 현장을 관리할 수 있으며, 다수의 사용자가 동시에 서버에 접속할 수 있다.

3. 적용 사례

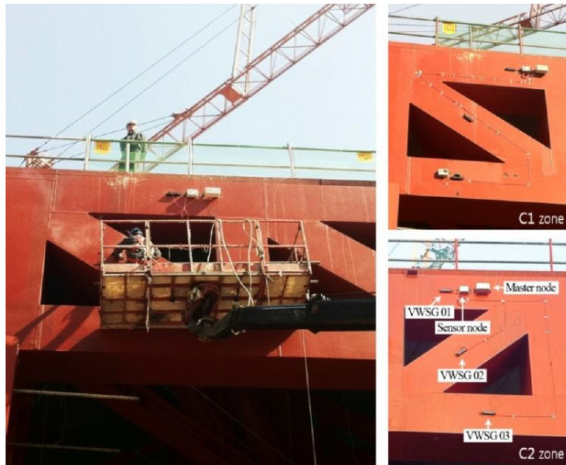
2장에서 소개된 무선계측시스템은 다양한 실 구조물에 적용되었다. 이에 대한 간략한 소개는 아래와 같다.

3.1 비정형 대형 건축물의 시공 중 모니터링

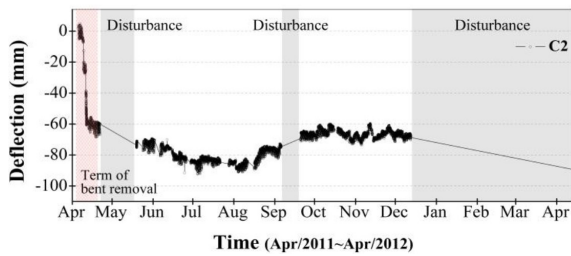
첫 번째는 〈Fig. 5〉, 〈Fig. 6〉, 〈Fig. 7〉과 같은 비정형 대형 건축물의 시공 중 모니터링 사례이다. 대상 구조물은 비정형의 대형 구조물이며, 외부가 다양한 패널로 마감이 되기 때문에 시공 중 안정성 및 정밀시공이 요구되는 현장이었다. 이를 시공 중에 무선 자동 계측시스템(변형률계 75개, 경사계 10개, 레이저 변위계 3개)이 설치되어 13개월 동안 계측되었다.



〈Fig. 5〉 SHM zoning on the irregular shaped building (Park et al., 2013)



〈Fig. 6〉 Installation of sensors (Park et al., 2013)



〈Fig. 7〉 Deflection data measured during 13-month monitoring (Park et al., 2013)

3.2 도로사면에 설치된 앵커 장력 모니터링

두 번째는 〈Fig. 8〉, 〈Fig. 9〉와 같은 도로사면의 붕괴를 방지하기 위해 설치된 앵커의 장력을 모

니터링한 사례이다. 일반적으로 도로사면에는 이것의 붕괴를 방지하기 위해 앵커에 장력을 가하는 방법이 사용된다. 그러나 이러한 앵커 장력은 시간이 지남에 따라 자연 손실이 발생하고, 혹은 눈, 비 등과 같은 요소로 인해 사면이 불안정화되어 앵커 장력의 변화를 초래하기도 한다. 따라서 도로사면의 붕괴를 방지하기 위해서는 앵커 장력을 모니터링할 필요가 있다. 그러나 일반적으로 도로사면은 도심에서 벗어난 곳에 위치하기 때문에 이를 주기적으로 계측하고 관리하기 위해서는 비용적 부담이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 앵커에 진동현 기반의 로드셀을 설치하여 앵커의 장력을 자동 계측하는 모니터링 시스템을 적용하여 약 31개월 동안 운영되었다.

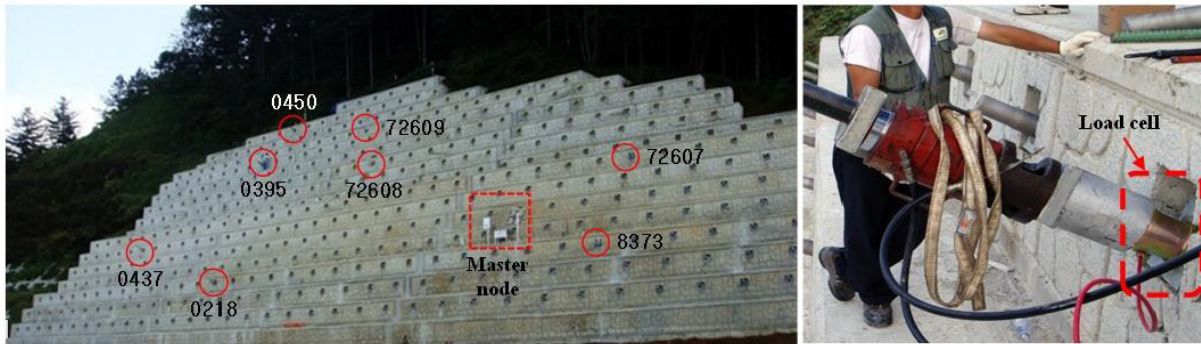
4. 요약

본 기사에서는 실 사회기반시설물 및 건축물에 적용 가능한 무선 센싱 시스템을 소개하였다. 이는 실용성 및 적용성을 높이기 위해 일방향의 계층형 무선 통신 네트워크 형태를 가지며, 절전 기능을 사용한다. 또한 웹-기반의 관리 프로그램을 통해 원거리에 위치한 구조물의 구조반응을 언제, 어디서든 확인할 수 있다.

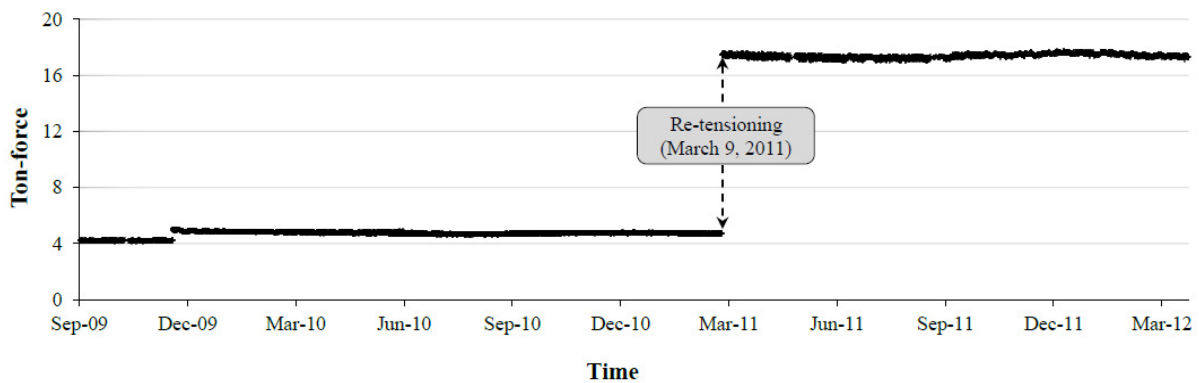
이는 자동 계측 및 무선 통신 기법을 사용하기 때문에 설치가 용이하고, 시공 작업의 방해가 적으며, 설치 이후의 유지관리 비용을 절감할 수 있는 이점이 있다. 그러나 실 구조물의 정확한 SHM을 위해서는 계측값의 분석 및 건전도평가 등에 관한 신뢰할 만한 기술 개발이 여전히 요구된다.

References

1. Brownjohn, J. M. W., "Structural health monitoring of civil infrastructure," Philosophical Transactions A, Vol. 365, 2007, pp.589-622.
2. Chang, P. C., Flatau, A., and Liu, S. C., "Review



〈Fig. 8〉 Master and sensor nodes for the field sensing of ground anchors (Choi et al., 2013)



〈Fig. 9〉 Time history graph before and after the re-tensioning work (Choi et al., 2013)

- paper: health monitoring of civil infrastructure," Structural Health Monitoring, Vol. 7, 2008, pp.5-19.
- Sohn, H., Farra, C. R., Hemez, F., and Czarnecki, J., "A review of structural health monitoring literature 1996-2001," Los Alamos National Laboratory, 2004.
 - Lynch, J. P., and Loh, K. J., "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring," Shock and Vibration Digest, Vol. 38, 2006, pp.91-128.
 - Ko, J. M., and Ni, Y. Q., "Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges," Engineering Structures, Vol. 27, 2005, pp.1715-1725.
 - Fan, W., and Qiao, P., "Vibration-based damage identification methods:a review and comparative study," Structural Health Monitoring, Vol. 10, 2011, pp.83-111.
 - Park, H. S., Shin, Y., Choi, S. W., and Kim, Y., "An integrative structural health monitoring system for the local/global responses of a large-scale irregular building under construction," Sensor, Vol. 13, 2013, pp.9085-103.
 - Choi, S. W., Lee, J., Kim, J. M., and H. S. Park, "Design and application of a field sensing system for ground anchors in slopes," Sensor, Vol. 13, 2013, pp.3739-3752.
 - <http://www.dstek.biz/>