

무선 자동 계측 시스템을 이용한 고층건물의 시공 중 수직 축소량 모니터링

Vertical Shortenings in a High-rise Building during Construction using Wireless Measurement System

1. 수직 축소량

기둥, 전단벽과 같이 건물을 구성하는 수직 부재는 수직 하중을 받게 되며, 이에 따라 축방향 축소량이 발생하게 된다. 축소량은 일반적으로 작용 하중에 비례하는 탄성축소량과 시간경과에 따라 증가하는 비탄성 축소량으로 나눌 수 있다. 한편 철근 콘크리트는 크리프와 건조수축으로 인해 탄성축소량의 2배 이상의 비탄성 축소량이 발생할 수 있다. 참고로 50층 건물의 경우 시공이 시작되고 30년 후에는 당초 설계높이보다는 약 100~150mm정도 축소되는 것으로 알려져 있다¹⁾.

이러한 수직 축소량의 크기에 영향을 미치는 요소에는 부재의 응력, 철근비, 표면적비, 환경조건 등이 있다. 그러나 이를 고려하여 동일 층 내에 있는 모든 수직부재에 대한 축소량이 동일하게 설계하는 것은 현실적으로 불가능하다. 전단



최 세 운

대구가톨릭대학교 건축학부 조교수



박 효 선

연세대학교 건축공학과 교수



그림 1 부등축소에 의한 피해 개념 및 사례²⁾

벽은 횡하중에 의해 단면적이 결정되기 때문에 전단벽은 기둥보다 상대적으로 작은 응력비를 가지게 되어 기둥보다 작은 축소량이 발생하게 된다. 따라서 인접한 수직 부재 간에는 축소량의 차이가 발생할 수 밖에 없으며, 이를 부등축소량이라 한다.

부등축소량은 바닥의 경사짐과 내부 칸막이(dry-wall)의 변형 및 파손, 엘리베이터의 가이드 레일의 브라켓 탈락, 외장재의 손상 등을 발생시켜 시공품질을 저하시킬 수 있다²⁾. 그리고 이는 수직부재를 연결하는 보, 아웃리거, 벨트 트러스 등에 부가 응력을 발생시켜 구조안전성을 저하시킬 수 있다. 최근 재료 개발로 인해 고강도 콘크리트의 적용이 증가하고 있는데, 이는 축강성 및 체적표면적비의 감소를 유발시켜 축소량을 증가시키는 현상을 가져오기 때문에 부등축소량에 대한 검토가 더욱 필요하다.

부등축소량은 건물의 높이가 증가함에 따라 누적이 되기 때문에 일반적으로 40층 이상 고층건물의 경우에 부등축소량에 대한 고려가 필요하다. 부등축소량은 고층건물 설계 및 시공과정에서 반영되고 있다. 설계단계에서는 공정 스케줄 및 재료 물성치 등을 가정하여 시공단계해석(construction sequence analysis)을 실시하고 이를 통해 축소량을 예측하게 된다.

이후, 시공단계에서는 보다 정확한 축소량 예측을 위해 콘크리트 재료시험을 실시하고, 재료시험에서 얻은 재료 물성치를 축소량 예측과정에 적용하여 축소량을 예측한다. 그러나 축소량 예측식은 재료의 이상화, 해석모델의 가정 등으로 인해 정확한 축소량 예측이 어렵고, 온도 및 습도 등의 실제 환경 차이, 시공 공정의 변경, 예상 시공 하중의 차이 등으로 인해 축소량 예측값이 실제 축소량값과 다르게 된다. 따라서 고층건물 공사과정에서는 실제 수직 부재의 축소량을 주기적으로 계측하고 이를 다시 예측량과 비교하는 피드백 과정이 필요하다. 이러한 과정을 통해 건물의 부등축소량을 예측하고 보정량을 결정하게 된다.^{3,4)}

2. 공사 중 축소량 자동 계측을 위한 무선 센서 네트워크 시스템

공사 중 축소량 데이터를 획득하는 방법으로는 각 센서를 수동 계측기를 이용하여 직접 계측하거나, 센서가 설치된 층에 데이터 로거를 설치하여 센서와 데이터 로거를 케이블로 연결하고 이를 다시 서버에 유선으로 연결시켜 자동 계측하는 방법 등이 활용되고 있다. 그러나 이들은 데이

터를 얻기 위해서는 매번 현장을 방문해야 하거나, 케이블로 인한 공사 작업에 불편을 끼치는 단점을 가진다. 또한, 데이터 양이 적어 신뢰성있는 축소량 보정이 어렵다.

따라서 케이블로 인한 시공 중 문제를 해결하기 위해서 무선 센서 네트워크를 이용한 자동 계측 시스템이 필요하다. 본 기사에서는 Choi 등(2013)이 제시한 무선 센서 네트워크 시스템을 이용한 고층건물의 축소량 자동 계측 사례를 소개하고자 한다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌⁵⁾를 참조하기 바란다. 이는 i) 부재의 반응을 계측하는 센서, ii) 센서의 계측값을 수집 및 송신하는 무선 센서노드, iii) 서버(관리 운영 프로그램 포함) 등으로 구성되어 현장에서 멀리 떨어진 원거리에서도 다량의 데이터를 용이하게 수집 및 관리할 수 있는 장점을 가진다.

2.1 센서

일반적으로 고층건물공사 중 축소량을 계측하기 위해서 진동현센서가 사용되어 왔다. 진동현센서는 인장, 압축 변형에 따라 주파수가 변화하는 원리를 이용한 센서이다. 이는 그림 2와 같이 길이방향으로의 변형에 따라 주파수가 변화하는 진동현, 양단에서 현을 고정시키는 클램프, 그리고 현을 여기하고 공진주파수를 측정하는 flucking coil 등으로 구성된다. 진동현센서는 전기저항식 변형률계와 비교하여 전송거리가 길며, 외부 전자기 영향, 진동 및 충격에 의한 영향이 적고, 반영구적 계측이 가능하다는 장점을 가

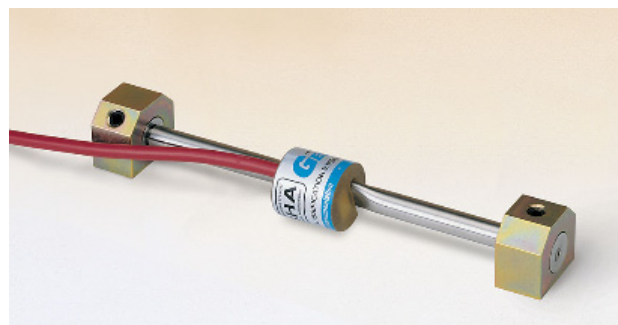
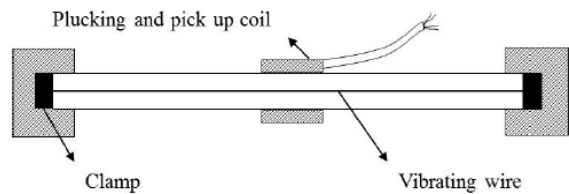


그림 2 진동현센서^{5,6)}

지고 있기 때문에 시공 중 장기간 계측이 필요한 축소량 계측분야에서 널리 사용되고 있다.

2.2 센서 노드

소개하는 센서 노드는 센서 처리 모듈, 무선 통신 모듈, 프로세서 및 절전회로 등으로 구성되며, 그림 3와 같다. 센서 처리 모듈은 유선으로 연결된 센서의 진동현을 여기서 키고, 센서로부터 발생한 공진주파수를 읽어오는 기능을 한다. 무선 통신 모듈은 회절성이 좋고, 전력 소모가 적으며, 전파 간섭의 영향이 작은 Industrial Scientific and Medical (ISM) 대역의 424MHz 극초단파를 사용한다. 이는 Line of sight(LOS)와 Non line of sight(NLOS)에 대하여 각각 300m, 70m 내외의 유효 통신 거리를 가진다. 프로세서는 내장된 메모리의 프로그램에 따라서 무선 센서 노드의 동작을 제어하여 소비 전류를 최소화하는 기능을 한다. 즉, 프로세서에 있는 타이머에 의해 동작(Action) 모드와 슬립(Sleep) 모드가 반복된다. 동작모드에서는 센서값을 계측하고, 무선 통신 장치를 이용하여 마스터 노드에 측정된 값을 전달하게 된다. 이후 무선 센서 노드는 슬립 모드가 되어 전원이 최대 절전 모드가 된다.

마스터 노드는 근거리 무선 통신 장치(ISM 대역의 소출력 무선 모듈)와 원거리 통신 장치(Code Division Multiple Access, CDMA)로 이루어져 있다. 이는 건물 내에 설치된 다수의 센서노드로부터 근거리 통신을 이용해 계측값을 받아 건물 밖에 있는 서버로 원거리 통신을 이용하여 수집된 데이터를 전달하는 기능을 한다.

2.3 서버 및 운영프로그램

현장에 설치된 센서로부터 계측된 모든 데이터는 마스터 노드를 통해 서버로 송신된다. 이 서버는 현장에 위치할 수도 있으며, 현장 밖에 위치하여 다수의 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 노드의 상태에 대한 주기적 분석 및 알람 기능이 있어서, 이에 대한 신속한 대처가 이루어지도록 한다.

서버는 웹-기반의 관리프로그램을 통해 언제, 어디서든 접속하여, 현장의 상황을 실시간으로 확인할 수 있다. 이는 서버에 수신된 데이터를 온라인으로 직접 접근할 수 있어서 별도의 작업없이 실시간으로 현장 상황을 파악할 수 있다. 그리고 이는 현장 관리의 편의성을 위해 동일한 무선



(a) 센서 노드

(b) 마스터 노드

그림 3 무선 노드⁷⁾

센서 시스템이 설치된 여러 현장을 관리할 수 있으며, 다수의 사용자가 동시에 서버에 접속할 수 있다.

4. 현장 적용

소개한 무선 자동 계측시스템은 공동주택 용도인 고층건물 공사현장에 적용되었다. 이는 3개의 타워 (타워 1 : 지상 66층, 지하 5층, 타워 2 : 지상 72층, 지하 5층, 타워 3 : 지상 46층, 지하 5층)로 이루어져 있다. 이는 횡하중 저항시스템으로 RC 전단벽, 아웃리거와 벨트트러스가 사용되었으며, 외부 기둥은 SRC 기둥으로 설계되었다. 그림 4와 같이 타워 1의 지상 10층과 25층, 타워 2의 지상 10층과 25층에 센서를 설치하였다. 센서노드는 설치된 센서의 위치와 무선 통신 장애 요소를 고려하여 설치 위치를 결정하였다.

변형률 센서, 센서 노드 등에 대한 설치 모습은 그림 5와 같다. 먼저 콘크리트 타설 전에 변형률 센서를 철근에 고정시키고, 케이블을 콘크리트 타설 이후, 센서 노드에 연결시킬 수 있도록 케이블을 정리하고 봉인처리 한다. 거푸집 제거 후, 봉인했던 케이블을 센서 노드에 연결시킬 수 있도록 케이블 작업을 한다. 마감 작업 및 무선통신을 고려한 위치에 센서 노드를 설치하고, 센서에 연결된 케이블을 센서 노드에 연결시킨다.



그림 5 센서 및 무선 노드 설치 사진⁵⁾

무선 노드는 기본적으로 소용량 배터리(2,700mAh)로 운용되지만, 실용적으로 시공 중 장기간 무선 자동 계측을 위해서는 전력 소비 문제를 고려해야 한다. 이를 위해 이 현장에서 사용된 센서노드는 1분 동안 계측하고 이후 30분 동안 슬립모드가 되도록 설정하여 배터리의 지속시간이 약 6개월 이상될 수 있도록 하였다. 한편, 마스터 노드는 상시로 켜져 있도록 하거나, 배터리 문제를 고려하여 하루 3회 1시간 10분씩 데이터를 수집하는 방법을 혼용하였다. 마스터 노드는 배터리만 이용할 경우 1개월 이상 운영이 어려워서 별도의 솔라셀을 사용하였다.

그림 6은 서버에 저장된 실제 계측된 데이터를 관리프로

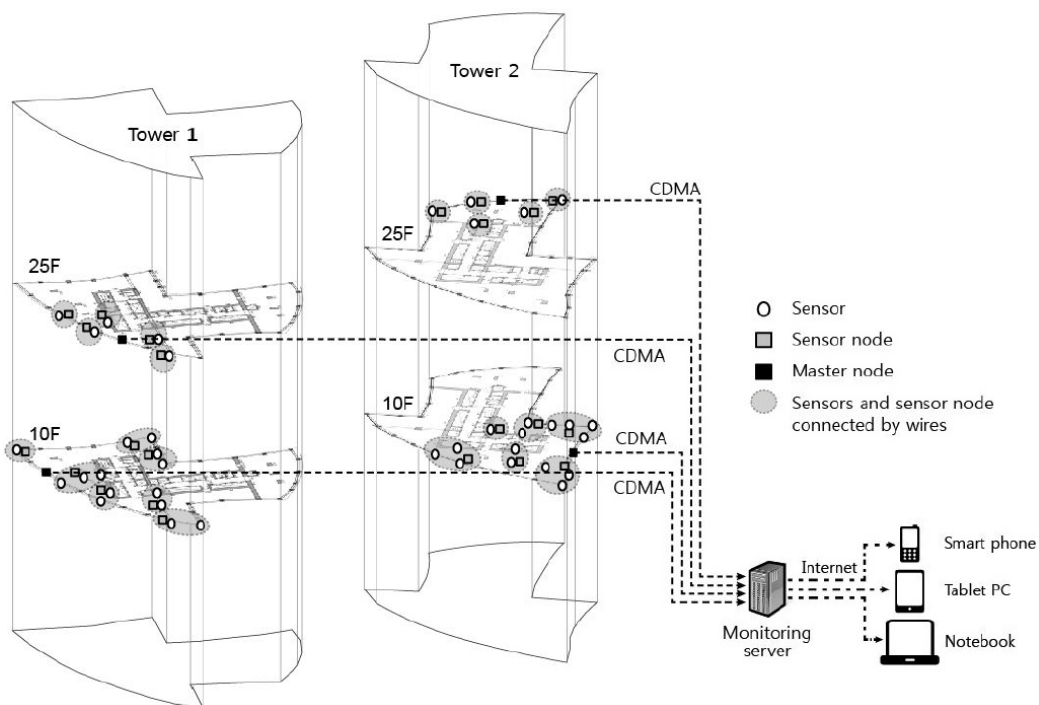
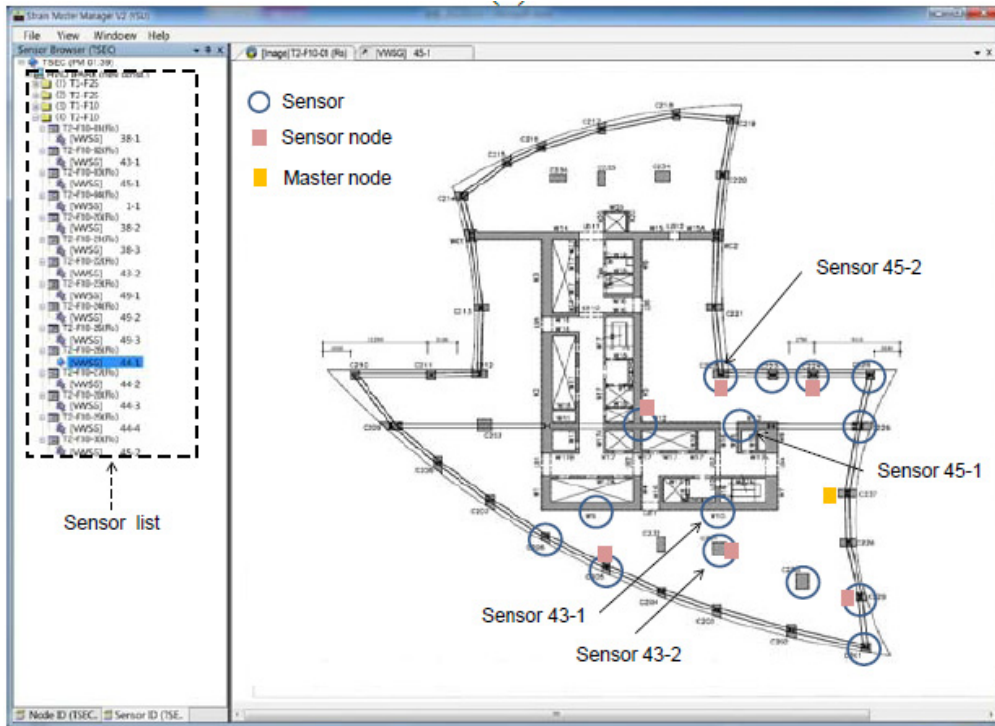
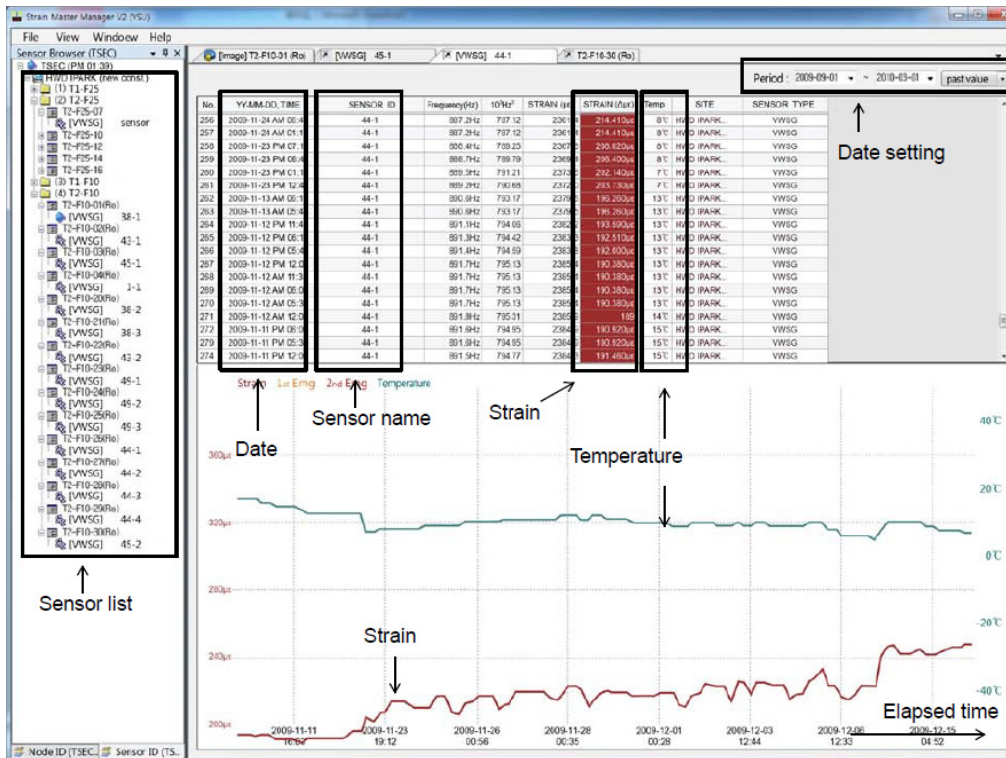


그림 4 센서 및 무선 노드 설치 위치 설명도⁵⁾



(a) 관리프로그램을 이용한 실시간 계측 모니터링 캡처 화면



(b) 타워 2의 10층에 설치된 센서 위치 정보 기능
그림 6 센서 및 무선 노드 설치 사진⁵⁾

그램을 통해 확인하는 캡처화면이다. 센서 리스트에서 원하는 센서를 선택하면 해당 센서에서 실시간 계측된 온도와 변형률값을 표와 그래프로 확인할 수 있다. 또한 조회기간을 조절하여 원하는 범위에서의 계측데이터 이력을 확인하고 계측데이터를 파일로 저장할 수 있어서 장기간 동안의 경향을 손쉽게 할 수 있다. 각 센서의 위치 정보를 함께 확인할 수가 있기 때문에 센서별 계측값을 비교, 분석하는데 편리하다.

4. 요약

본 기사에서 소개한 무선 센서 네트워크 시스템을 이용한 고층건물의 축소량 자동 무선계측 시스템은 현장 적용을 통해 시스템의 적용성과 효율성을 확인하였다. 이는 무선 자동 계측이 가능하기 때문에 원거리에서 계측값 확인 및 관리가 실시간으로 가능하며, 축소량 업무와 관련한 인력 등의 비용을 감소시킬 수 있다. 또한 무선 센서 노드를 적용하여 사용 케이블을 최소화하였기 때문에 공사 작업에 대한 영향을 최소화하는 이점을 가진다.

무선 자동 계측은 다수의 센서 관리를 용이하게 할 뿐 아니라, 다량의 데이터의 분석을 신속하게 할 수 있는 장점

을 가지기 때문에, 축소량 기술을 축적하고 향상시키는데 기여할 수 있다.

참고문헌

1. 하태훈, 이성호, 오보환, (2008), 부산 우동 콘도미니엄 현장의 축소량 예측 및 보정, 52(3), 87-90.
2. 김성수, (2006), 초고층 구조물의 기둥 축소량 예측에 관하여, 건축구조기술사회지, 13(2), 48-55.
3. 소광호, 양극영, (2003), 시공성 향상을 위한 초고층 건물의 기둥 축소량 보정법에 관한 연구, 대한건축학회 논문집-구조계, 19(11), 157-164.
4. 소광호, 정동환, 양극영, (2003), 초고층 기둥축소량 보정을 위한 측량기법에 관한 연구, 대한건축학회 논문집-구조계, 19(5), 169-176.
5. Choi, S.W., Kim, Y., Kim, J.M., Park, H.S., (2013), Field monitoring of column shortenings in a high-rise building during construction, Sensors, 13, 14321-14338.
6. <http://www.geokon.com/Strain-Gages>
7. <http://dstek.biz> 