

---

# Zigbee 무선통신 네트워크 기반 변형측정 시스템 설계 및 개발

김상석\* · 박장식\*\* · 고석조\* · 노희중\*\*\*

## Design and Development of Strain Measurement System Based on Zigbee Wireless Network

Sang-Seok Kim\* · Jang-Sik Park\*\* · Seok-Jo Go\* · Hee-Jong Ro\*\*\*

### 요약

본 논문에서는 구조물의 안전한 관리를 위하여 진동현방식 센서를 이용하여 변형을 측정하고 Zigbee 무선 네트워크를 통하여 원격 모니터링할 수 있는 시스템을 구현하였다. 구현한 변형측정기는 진동현방식 센서를 구동하여 출력되는 신호의 주파수를 측정하여 변형을 계산하고, 변형 측정에 있어 요구되는 온도 보상을 위한 온도를 측정한다. 2축 가속도센서를 이용하여 변형의 방향을 측정할 수 있다. 개발한 변형측정기에는 보다 효율적인 모니터링을 위하여 유무선 통신 기능이 있다. 실험을 통하여 개발한 진동현방식 변형측정 시스템이 원격모니터링에 효과적임을 확인한다.

### ABSTRACT

In this paper, a system using vibrating wire sensor and zigbee wireless network has been implemented to monitor and manage the structure. The implemented strain controller drives vibrating wire sensor and computes strain from measuring frequency of the output signal. Temperature sensor is included to compensate strain by temperature. Using two axis acceleration sensor of strain controller can measure the direction of strain or deformation. To measure strain more effectively, wired and wireless communication function is included in this device. As results of experiments, it is shown that the developed system can be effectively applied to measure strain of the structure.

### 키워드

Vibrating Wire Type, Strain Guage, Frequency Counter, Zigbee  
진동현방식, 변형 센서, 주파수 카운터, Zigbee

## 1. 서론

산업이 발전하면서 건축 구조물들은 더욱 거대화되어 가고 있으며, 유럽, 일본 등에서는 구조물의 안전 관리를 강화하고 있다.

구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 주로 변형률 기반의 구조 반응 모니터링이 수행된다. 변형률로부터 부재의 최대 응력 또는 부재력 수준을 결정하고 설계 기준에 의하여 부재의 허용 응력 또는 설계 강도와의 비교에 의하여 구조물의 안정성을 평가한다[1].

---

\* 동의과학대학교 (kimss@dit.ac.kr, sjgo@dit.ac.kr)

\*\* 교신저자 : 경성대학교 전자공학과(jsipark@ks.ac.kr)

접수일자 : 2012. 05. 09

심사(수정)일자 : 2012. 05. 25

게재확정일자 : 2012. 06. 07

구조물의 안전 진단에는 크랙(crack), 구조물의 기울기, 비파괴 검사 등이 있으며, 크랙 또는 변형에 대한 측정능은 구조물의 안전과 직결되는 아주 중요한 요소이다. 크랙 또는 변형을 측정하기 위하여 진동현방식 센서 또는 전기저항식 센서가 사용된다. 전기저항식 센서는 사용하는데 편리한 점이 있지만 출력신호가 미약한 DC전압이기 때문에 외부의 전기적인 잡음이나 전자파에 의한 계측 오차가 발생하며, 박판 저항 스트레인 게이지 부착용 접착제의 시간 경과에 따라 화학적 상태 변화가 발생하여 게이지 부착성이 저하될 수 있기 때문에 영년 변화를 일으킨다. 따라서 진동현방식 센서가 일반적으로 사용되고 있다.

진동현방식 센서를 이용하여 발전소, 댐 등의 변형을 측정하는데 주로 사용되고 있다. 최근에는 터널의 변형을 측정하기 위하여 다수의 진동현방식 센서를 이용하는 방법이 제안되었다[2,3]. 기존의 크랙 및 변형 측정기는 단순 변위만 측정하여 실제로 중요한 크랙의 진행 방향에 대해서는 육안식별만 이루어지고 있는 실정이다. 또한, 진동현방식 센서를 고정하여 설치하고 휴대용 계측기를 이용하여 직접 측정하는 방식이 주로 사용되고 있으나, UHF(740 MHz) 무선통신을 이용하여 관로의 변형을 측정하는 방법이 제안되기도 하였다[4].

구조물의 안전진단과 변형에 대한 대응을 위해서는 변형 측정뿐만 아니라 변형의 방향을 분석하는 것이 필요하다. 또한 교량, 항만, 교통 시설물, 그리고 건축물의 안전관리를 위하여 텔레메트릭스(telemetry)의 표준으로 IEEE 1451에서는 네트워크와 트랜스듀서(transducer) 간의 표준 인터페이스를 규정하고 구조물 등의 안전진단에 적용할 것을 권고하고 있어 IEEE 1451의 무선 네트워크 표준인 Zigbee를 적용한 변형 측정 시스템이 필요하다.

본 논문에서는 구조물의 상태를 보다 효율적으로 진단하기 위하여 진동현방식 센서와 가속도센서를 이용하여 구조물의 변형과 변형 진행 방향을 측정할 수 있는 변형측정기와 모니터링 프로그램을 개발하였다. 변형측정기(strain controller)는 진동현방식 센서와 마이크로콘트롤러를 이용하여 측정된 변이를 Zigbee 무선통신 네트워크를 통하여 전송하고 원격지에서 모니터링 할 수 있다. 변형측정기는 진동현방식 센서를 구동하여 출력되는 신호의 주파수를 측정하여 변형을

계산한다. 2개의 가속도 센서를 이용하여 변형 방향을 측정함으로써 보다 효과적으로 구조물의 안전진단을 할 수 있도록 한다. 또한 진동현방식 센서의 온도 변화에 대한 보상을 위하여 온도 측정 기능이 있다. 실험을 통하여 개발한 변형측정 시스템이 효과적으로 구조물 안전진단에 활용할 수 있음을 확인하였다.

## II. 진동현방식 센서와 센서 네트워크

### 2.1. 진동현방식 센서

진동현방식 센서(vibrating wire type strain gauge)는 물리량의 변화에 따라 탄성체의 고유 진동수가 변화하는 현상을 이용한 센서로서 탄성체의 고유 진동수는 품질계수(Q factor)가 높기 때문에 재현성, 분해능 및 안정성이 좋지만 입출력 관계가 비선형이기 때문에 신호처리가 복잡하다.

그러나, 변이에 대하여 주파수 변화가 발생하기 때문에 AD변환 및 디지털시스템에서의 처리가 용이하다. 현(wire), 음자, 복합음자, 원판 및 원통 등의 진동자가 하중 압력, 변위, 각도 변형률 등을 측정하는데 사용된다. 진동현방식 센서는 전기적 변환기가 아니라 기계적인 변환기이다. 진동현방식 센서의 구조는 그림 1과 같다.

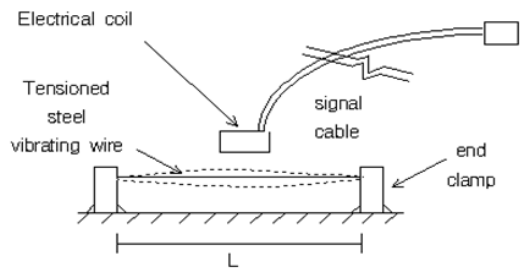


그림 1. 진동현방식 센서의 기본 구조  
Fig. 1 Basic structure of vibrating wire type sensor

진동현방식 센서는 진동현(vibrating wire, 경강선)을 센서 구조에 맞게 플랜지 등의 고정단에 일정한 장력을 가하여 고정시키고 전자력을 형성시킬 수 있는 마그네틱 코일(flucking coil)을 진동현에 위치시켜 출력장치에서 마그네틱 코일에 신호를 입력하면 강한

전자력이 형성되어 진동현을 진동시킨다. 진동현은 진동이 발생하고 마그네틱 코일을 통한 공진 주파수로 측정되어 출력장치에 초당 진동수(frequency)로 표시된다.

진동수는 현의 길이, 장력, 밀도, 중력가속도, 탄성계수, 변형률로 식 (1)에 의하여 계산할 수 있다.

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma g}{\rho}} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E\epsilon g}{\rho}} \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 진동수,  $L$ 은 현의 길이(cm),  $\sigma$ 는 현의 장력(tensile force,  $kg/cm^2$ ),  $g$ 는 중력가속도(gravitation acceleration,  $m/sec^2$ ),  $\rho$ 는 현의 밀도(density,  $kg/m^3$ ),  $E$ 는 현의 탄성계수(elastic modulus,  $kg/cm^2$ ),  $\epsilon$ 은 현의 변형률(strain)이다.

현의 변형률은 식 (2)와 같이 현의 자유 진동수의 제곱에 비례한다.

$$\epsilon = \frac{4L^2 F^2 \rho}{Eg} = Kf^2 \quad (2)$$

현의 진동수를 측정하여 현의 변형률 또는 현이 고정된 두 지점 사이의 길이를 측정한다.

그림 2는 종래의 진동현방식 센서를 이용한 휴대형 변형 측정장치이다.



그림 2. 휴대형 진동현 센서와 계측장치  
Fig. 2 Portable vibrating wire type sensor and measurement device.

변형이 발생하거나 구조물의 주요 위치에 진동현방식 센서를 부착하고 계측장치를 연결하여 측정된 결과를 기록하고 있다. 따라서, 직접 센서가 설치된 위

치로 이동하지 않고 다양한 위치의 변형을 측정 및 실시간 모니터링할 수 있는 원격 모니터링 시스템의 구현하기 위한 단말기가 필요하다.

## 2.2. Zigbee 무선센서 네트워크

무선센서 네트워크 WSN(wireless sensor networks)는 센서뿐만 아니라 구동기(actuator)도 포함하는 제어계측용 무선 네트워크를 의미한다. 무선센서 네트워크는 종래의 이더넷, 직렬통신, 필드버스 등의 유선 네트워크를 치환하는 것뿐만아니라 제어계측 분야에서 종래의 유선방식에서 다루기 어려운 응용분야와 새로운 통신 인프라를 제공하고자 한다. 무선센서 네트워크는 일반적으로 게이트웨이를 경유하여 이더넷 백본(backbone), 직렬통신, 필드버스 등의 유선 네트워크와 접속된다. 계측제어 데이터 액세스 단말 기능을 담당한다.

무선센서 네트워크를 구축하는데 있어 무선통신 표준으로 주로 사용되는 것이 Zigbee 표준이다. Zigbee는 무선센서 네트워크에 적용하는 저속 통신의 무선 PAN(private area network)으로 2003년 IEEE에 의하여 IEEE802.15.4-2003 규격으로 승인되었다[5]. IEEE 802.15.4의 규격 범위는 물리층과 미디어 액세스층뿐이고 상위 프로토콜은 Zigbee 연합(zigbee alliance)에 의하여 별도로 개발되고 있다. 표 1에는 WiFi, Bluetooth 그리고 Zigbee의 무선규격을 비교를 나타내었다.

표 1. 무선규격 비교  
Table 1 Comparison wireless specifications

IEEE규격	802.15.11b	802.15.1	802.15.4
일반명칭	WiFi	Bluetooth	Zigbee
주파수	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
변조방식	CCK, PBCC	GFSK	O-GFSK
확산방식	DSSS	FHSSS	DSSS
통신거리	100 m	10 m	30 m
통신속도	11 Mbps	1 Mbps	250 kbps
노드수	32	7	65,536
스택용량	1 MB 이상	250 kB이상	16-128 kB
전자수명	수시간	수일	수년
응용	무선LAN	무선음성	제어계측

IEEE802.15.4 규격은 가전제품 무선통신의 표준화 업계 단체인 HomeRF 워킹그룹이 제안한 HomeRF lite 규격으로부터 전용한 무선통신 프로토콜이다. IEEE 802.15.4 가 이용 가능한 주파수 대역은 868 MHz(유럽), 915 MHz(북미) 및 2.4 GHz(전세계)의 3 종류가 있다. IEEE 802.15.4 Zigbee 규격은 낮은 통신속도, 낮은 전력소비 및 저비용의 특징을 가지고 있다.

### III. Zigbee 기반 변형측정기 설계 및 구현

#### 3.1. 변형측정기 설계 및 구현

그림 3은 구조물 변형측정 시스템의 구성도이다. 진동현 센서의 주파수를 측정하여 변형을 측정하는데 있어 주변 온도의 영향을 받는다. 따라서 주변 온도에 의한 오차를 보정하기 위하여 온도센서를 포함하고 있다.

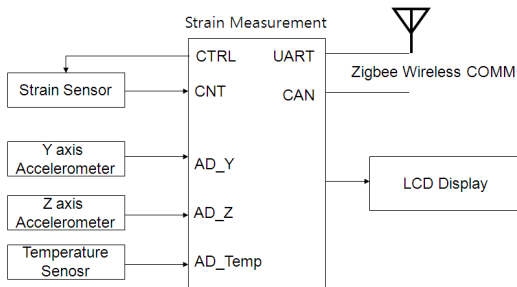


그림 3. 구조물 변형측정 시스템의 구성도  
Fig. 3 Configuration of strain measurement system of a structure.

변형측정기는 ATMEEL사의 AT90CAN128 MCU를 이용하여 구현하였다. AT90CAN128 MCU는 시리얼 통신과 CAN통신을 지원한다. 최근 CAN통신은 방재 센서네트워크 표준인 IEEE1451에 포함되었다. 개발한 변형측정기의 유선네트워크를 통한 모니터링을 위하여 활용할 수 있도록 CAN 기능을 포함하도록 설계하였다. 또는 Zigbee 무선 네트워크를 통하여 데이터를 전송하는 기능을 포함한다.

제어 펄스를 발생하여 센서의 현을 진동시키고 현의 진동을 30에서 3,500 Hz 범위의 주파수를 측정할

수 있도록 설계되었다. Y축과 Z축 기울기센서의 출력을 AD변환하여 구조물의 변형 방향을 측정한다. AD 변환기를 이용하여 구조물에 부착된 온도센서로 주변 온도를 측정하여 온도 보상을 한 변형을 측정할 수 있는 기능을 포함하고 있다. 측정된 데이터(변형률, 기울기, 온도)를 LCD패널을 통하여 표시한다.

#### 3.2. Zigbee 무선센서 네트워크 구성

측정된 변형, 주변 온도, Y, Z 축의 기울기 데이터를 Zigbee 네트워크를 통하여 전송한다. Zigbee모듈은 (주)레이디오펠스사의 MG2455를 사용하여 개발하였다. MG2455는 IEEE 802.15.4와 Zigbee 사양에 맞도록 설계되었으며 250 kbps 데이터전송을 기본으로 하고 500 kbps 또는 1 Mbps의 개별 응용도 지원한다. 개발한 Zigbee 모듈은 변형측정기에 연결된다.

그림 4는 변형 데이터를 모니터링하기 위한 흐름도이다. 관리자 노드(administrator node)는 전원을 켜면 Zigbee 코디네이터로서 자동으로 네트워크를 기동시킨다.

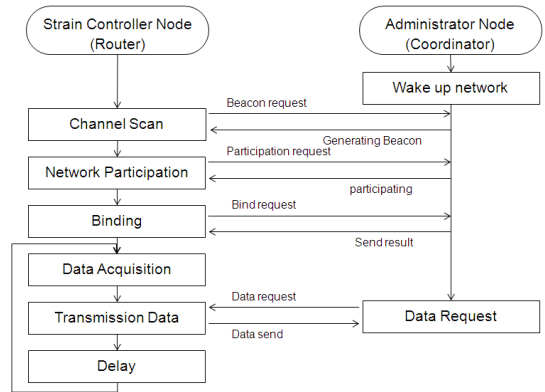


그림 4. 데이터 모니터링을 위한 흐름도  
Fig. 4 Data monitoring flowchart.

변형측정기 노드는 전원을 켜면 자동으로 비콘 요구를 브로드캐스트하여 주변의 네트워크를 찾는다. 코디네이터는 비콘 요구를 받으면 비콘을 발행한다. 변형측정기 노드는 수신한 비콘으로 주변에 있는 코디네이터 노드의 존재를 알기 때문에 네트워크 참가를 코디네이터에 신청한다. 변형측정기 노드의 네트워크

참가가 허락되면 관리자 노드로 변형측정 데이터 전송할 준비를 하고 대기 상태에 들어 있다는 것을 나타낸다. 쌍방의 프로파일과 클러스트 조합을 수행하여 일치하면 바인딩 확립을 코디네이터에 요구하고 결합된 바인딩으로 데이터 요청이 있으면 데이터를 전송한다.

#### IV. 실험결과 및 고찰

변형을 측정하고 원격 모니터링 실험을 위하여 그림 5와 같이 진동현방식 센서와 변형측정기 그리고 PC와 직렬로 연결된 코디네이터인 Zigbee 수신기로 변형측정 시스템을 구성하였다. 진동현방식 센서는 (주)대동계측의 진동현방식의 변형센서 DP50을 사용하였고 1,200에서 3,500 Hz의 진동을 한다. 모니터링 프로그램은 LabVIEW를 이용하여 개발하였으며, Zigbee 모듈을 통하여 수신한 변형과 기울기를 실시간으로 표시한다. Zigbee 송수신모듈은 MG2455를 이용하였다.

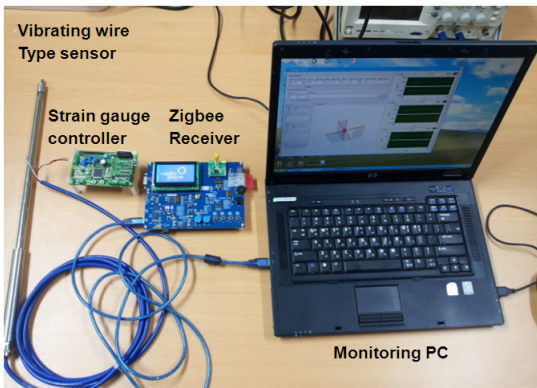


그림 5. 변형측정기, 모니터링 PC 간의 Zigbee 무선 네트워크 구성

Fig. 5 Configuration of Zigbee wireless network between strain gauge controller and monitoring PC.

그림 6은 변형측정기의 진동현방식 센서 구동신호와 센서의 출력신호를 비교한 것이다. 변형측정기에서 출력된 스위프(sweep) 구형파에 대하여 현의 길이에 대응하는 진동신호가 출력된다. 변형측정기의 MCU에서 출력신호의 진동수를 계수하여 주파수를 측정한다.

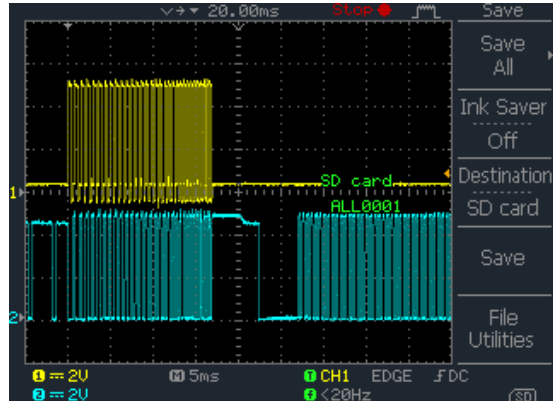


그림 6. 진동현방식 센서 구동신호와 출력신호의 비교  
Fig. 6. Comparison driving and output signals of vibrating wire type sensor.

#### V. 결론

구조물의 안전 상태를 보다 효율적으로 모니터링하기 위하여 Zigbee 무선통신 기반의 변형측정기 시스템을 구현하였다. 개발한 변형측정 시스템은 진동현방식 센서, 변형측정기, 모니터링 PC로 구성된다. 변형측정기는 진동현방식 센서로 구동신호를 인가하여 센서의 출력 주파수를 측정하여 변형을 계산하고 온도 보상 기능을 갖는다. 특히, 개발한 변형측정기는 2축 가속도 센서를 이용하여 변형을 방향을 예측할 수 있도록 한다. 변형측정기는 기본적으로 Zigbee 무선 네트워크를 통하여 원격 모니터링을 할 수 있으며, 유선으로는 CAN 네트워크를 구성할 수 있다. 개발한 변형측정 시스템은 유무선센서 네트워크를 효과적으로 구현할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 2011년도 (주)대동계측과 경성대학교에서 부산테크노파크의 지역기반육성기술개발사업의 지원으로 수행되었습.

#### 참고 문헌

- [1] 이흥민, 오병관, 박효선, “변형률 센서 기반 구조부재의 안정성 평가에 관한 기초 연구”, 한국

전산구조공학회 정기학술대회 논문집, pp. 700-703, 2010.

[2] Sivaram M. S. L. Cheekiralla, "Development of a Wireless Sensor Unit for Tunnel Monitoring", Thesis of Bachelor, Massachusetts Institute of Technology, Feb., 2004.

[3] Jung Yeol Kim, Soon Wook Kwoon, Moon Young Cho, "Development of Wireless Module for Tunnel Vibratin Wire Type Sensor", 24th International Symposium on Automation & Robotics in Construction 2007, pp. 27-33, 2007.

[4] P. Bielen, M. Lossie and D. Vandepitte, "A Low Cost Wireless Multi-channel Measurement System for Strain Guages", Proceedings of ISMA2002, Vol. 2, pp. 663-670, 2002.

[5] IEEE Standard 802.15.4-2003, IEEE Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Peronal Area Networks, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2003.

저자 소개



**김상석(Sang-Seok Kim)**

2000년 부산대학교 토목공학과 졸업(공학사)  
 2002년 부산대학교 대학원 토목공학과 졸업(공학석사)

2006년 부산대학교 대학원 토목공학과 졸업(공학박사)  
 2006년~2007년 한국해양대학교 토목공학과 연구교수  
 2010년~현재 동의과학대학교 산학협력단 교수  
 ※ 관심분야 : GIS, 측량, USN



**박장식(Jang-Sik Park)**

1992년 부산대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1994년 부산대학교 일반대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1999년 부산대학교 일반대학원 전자공학과 졸업(공학박사)  
 1997년~2011년 동의과학대학 전자과 교수  
 2011년~현재 경성대학교 전자공학과 교수  
 ※ 관심분야 : 신호처리, 영상처리 및 인식, 음성 및 음향 신호처리



**고석조(Seok-Jo Go)**

1994년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사)  
 1996년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)

2002년 부산대학교 대학원 지능기계공학과 졸업(공학박사)  
 2001년~현재 동의과학대학교 컴퓨터응용기계계열 교수  
 2011년 8월~2012년 7월 Purdue University(USA) 기계공학과 방문연구  
 ※ 관심분야 : Intelligent Control, Dual Arm Robot, Smart Actuator, Active Magnetic Bearing



**노희종(Hee-Jong No)**

2011년 동의과학대학교 토목과  
 2001년~2007년 대동계측 관리과장  
 2008년~현재 (주)대동계측 대표이사

2009년, 2009신기술혁신상 수상(부·울지방중소기업청장)  
 2011년 부산혁신기업인상 수상(부산광역시 시장)  
 ※ 관심분야 : 토목계측센서, 지반공학