

소규모 구조물의 안전진단을 위한 무선 센서 네트워크

Wireless Sensor Network for Health & Safety Monitoring of Small Sized Structures

맹 주 상* · 김 일 환*
(Ju-Sang Maeng · Il-Hwan Kim)

Abstract - Wireless sensor networks have been shown to be an effective method for health monitoring of civil structures. In this paper a wireless strain sensor system which will allow easier collection of accurate strain signals in small sized structures is described. The experiment result shows that the developed wireless sensor system and the proposed network system are fit for health & safety monitoring and control of structures

Key Words : Ubiquitous sensor network, Zigbee, Gateway, Health monitoring,

1. 서 론

1995년 1월 시설물 안전 관리에 관한 특별법 제정 이후 대형 시설물(1·2종)은 비교적 체계적으로 관리되고 있으나, 소규모 시설물은 상대적으로 관리가 취약하다. 소규모 시설물에 대해서는 재난 및 안전관리기본법에 근거하여 관계 공무원에 의한 정기 및 수시 안전점검 등의 관리를 실시하고 있으나, 안전점검 및 진단의 시기, 방법, 절차 등의 기준이 정비되어 있지 않아 체계적인 시설물 관리가 어려운 실정이다[1]. 고로, 소규모 시설물 또는 구조물의 붕괴사고가 자주 발생함에 따라, 그로 인한 피해를 줄일 수 있는 구조물 유지 관리 기술에 대한 중요성이 부각되고 있다. 구조물 건전성 모니터링 기술은 구조물의 상태를 파악하고 진단, 평가하는 기술로서, 현재 전 세계적으로 활발하게 관련 기법 및 장비들에 관한 연구가 이루어지고 있다[2][3][4]. 한편, USN (Ubiquitous Sensor Network)이란 여러 개의 센서 노드(Sensor Node)와 싱크 노드(Sink Node)로 구성된 통신망으로서, 센서들은 주변에서 가장 가까운 센서 노드로 패킷 단위로 데이터를 전송하고 센서 노드로 전송된 데이터는 USN 게이트웨이를 통하여 관리자에게 전송되는 시스템을 말한다[4]. 국내에서는 USN 분야 기술 경쟁력 제고 및 초기 수요 창출 지원을 위해 2005년부터 환경 자동화, 안전 생활 및 문화 관련 서비스를 대상으로 시범사업 및 현장 시험 수행 중이다. ETRI에서는 USN 네트워킹 핵심요소 기술 확보를 위해 신뢰성 지원 라우팅 기술, 이종망 간 상호 운용성 기술, 위치인식 및 동기화 기술, 효율적인 자원관리를 위한 미들웨어 기술을 적용한 핵심 기술을 개발 중에 있으며, 또한, USN 네트워킹 플랫폼 핵심기술 확보를 위해 브리지 기반 센서 네트워크 확장 기술과

Mesh 라우팅 기반 센서 네트워킹 S/W 기술을 개발 중에 있다. 방송통신위원회는 2010년 시행된 사물통신 시범사업에서 도심 사물지능통신 체감서비스 구현, 사물지능통신을 적용한 기상정보 수집체계 효율성 검증 및 사물지능통신 기반의 녹색도시 통합관제 시스템을 구축하였다. 세계적으로는 인텔의 Vibration Monitoring은 무선센서 네트워크를 통해 반도체 제작 장비의 상태를 감시하기 위한 서비스를 개발하였으며, MIT와 공동으로 미국 보스턴의 상수도 및 하수구의 관리를 위해 수압과 pH 센서를 이용하여 상수의 질을 감시하는 시스템을 개발하였다. IBM은 침단 센서 관측 네트워크를 이용해 실시간으로 뉴욕 허드슨강의 상태를 모니터링할 수 있는 스마트 워터 그리드(Smart Water Grid) 시스템을 구축하여 깨끗한 물을 유지·공급하도록 하였다. 영국 예식스 대학에서는 센서 네트워크 기반의 로봇 물고기를 설계하여 수중 오염을 감시하는 목적의 생태 환경 모니터링 시스템 (스마트 리버) 프로젝트를 진행하였다.

현재까지의 주요연구는 산불 관리, 교량 관리 및 산업시설 환경 정보 수집을 통한 관리자의 수동적인 환경 모니터링을 목표로 하는 일반적인 USN이 주를 이루고 있었으나[1][2], 본 논문에서는 노후 되거나 자연재해, 외력 등의 이유로 변형이 될 가능성이 있는 구조물의 취약지역에 센서를 부착하여 구조물의 안전 환경을 오브젝트화 하여 위험을 동적으로 모니터링 및 관리함으로써 보다 능동적으로 안전을 도모할 수 있는 시스템의 현장 적용 가능성을 검증하였다.

2. 시스템 구성

본 논문에서는 구조물의 안전 관리를 오브젝트화 하여 관리하는 시스템을 그림 1과 같이 제안한다. 센서 노드에서 스트레인 게이지 변형률 정보를 Zigbee 통신으로 게이트웨이로 전송하고, 게이트웨이에서는 센서 노드의 변형률 정보를 수집하여 센서 노드를 제어하고, 수집된 정보를 TCP/IP 통신으로 미들웨어에 전송하고, 미들웨어는 모든 게이트웨이로 부터 변형률 정보를 수집하

* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University, Korea.
E-mail: ihkim@kangwon.ac.kr

* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University, Korea.

Received : April 18, 2018; Accepted : July 4, 2018

여 데이터베이스 서버에서 오브젝트화 하여 관리하고, 사용자 인터페이스(Graphical User Interface)로 오브젝트 단위로 모니터링 및 분석하도록 한다. 또한 블루투스 4.0 기반으로 안드로이드 어플리케이션을 설계하여 현장에서 개별 센서 노드의 정보를 표시할 수 있도록 하였다.

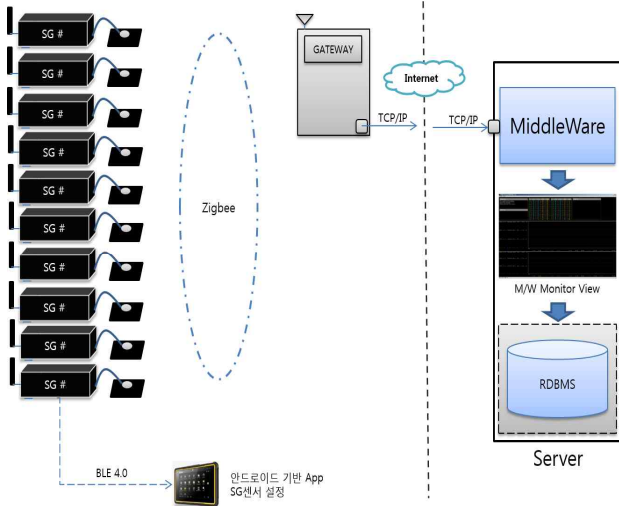


그림 1 시스템 구성도
Fig. 1 System configuration

2.1 센서 노드 설계

센서 노드는 스트레인 게이지를 이용하여 구조물의 변형률을 측정한다. 변형률이 설정 임계값을 넘으면 1초의 주기로 게이트 웨이에 변형률 정보를 전송하고 전력 소비를 줄이기 위해 슬립 상태로 머무른다. 센서 노드의 하드웨어 구성을 그림 2에 나타낸다. MCU(Micro Controller Unit)는 Atmega128를 사용하였으며, 블루투스 모듈과 Zigbee 모듈통신을 위해 UART 2 채널을 이용한다. 구조물 변형률 측정을 위해 스트레인 게이지 FLA-5-11 (Tokyo Sokki Kenkyzo)를 사용하였다. 그림 3에 센서 노드의 소프트웨어 흐름도를 나타낸다.

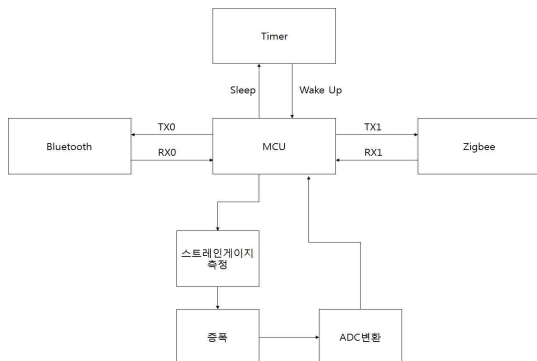


그림 2 센서 노드 블럭선도
Fig. 2 Block diagram of the sensor node

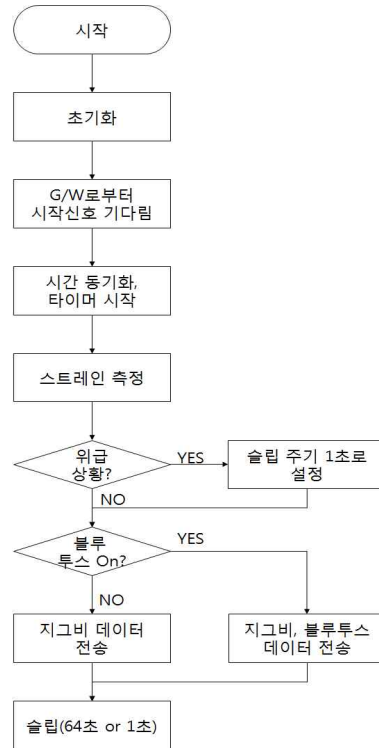


그림 3 센서 노드 동작 흐름도
Fig. 3 Flowchart of the sensor node operation

구조물의 변형률은 휘스톤 브릿지 회로를 이용하여, 구조물에 변형이 발생하면 브리지 저항은 $R + \Delta R$ 이 되어 식 (1), (2), (3)을 이용하여 출력전압을 측정한다.

$$V_o = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} V_{EX} \tag{1}$$

$$V_o = \frac{\Delta R}{4R} V_{EX} \tag{2}$$

$$V_o = \frac{1}{4} \times GF \times \epsilon \times V_{EX} \tag{3}$$

여기서, V_o 는 출력전압, V_{EX} 는 입력전압, R 는 저항, GF 는 gauge factor, ϵ 는 변형률이다. 측정된 전압은 아주 미세한 전압 이므로 노이즈 제거와 증폭을 위해 2 채널 증폭기 INA2126 (Texas Instrument)를 사용하여 805배 증폭하였으며, 최대 변형률은 식 (4)와 같다.

$$3.3 = \frac{1}{4} \times 2.1 \times \epsilon \times 3.3 \times 805$$

$$3.3 = 1394.6625 \times \epsilon$$

$$\epsilon = 0.0023661638568471 \tag{4}$$

센서 노드의 통신부는 게이트웨이와 통신을 위해 근거리 통

신(20~100m)을 지원하는 IEEE 802.15.4 표준(Zigbee)으로 네트워크를 구성하였으며, FS769BS(팜테크)을 사용하여 전력소모를 최소화하였다. 통신 방식은 여러 개의 센서 노드를 성형으로 구성하여 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식으로 게이트웨이에 변형된 데이터를 전송한다. 또한, 근거리에서 안드로이드 어플리케이션을 이용하여 센서 노드를 설정하거나 모니터링 하기 위하여 블루투스 4.0 BLE(Bluetooth Low Energy)인 HM-11을 사용하여 통신하도록 설계하였다.

2.2 게이트웨이 설계

게이트웨이는 센서 노드로부터 데이터를 전송 받아 관리하며 TCP/IP 통신을 통해 미들웨어 서버 플랫폼에 일정 주기로 센서 정보를 전달하는 역할을 수행한다. 설계한 게이트웨이의 주요 사양은 표 1과 같다.

표 1 게이트웨이 사양

Table 1 Gateway Specification

항 목	규 격
Main Board	Advantech Mini Board
CPU	ATOM 1.6Ghz
O/S	Windows 7 EMD
RAM	2GB
Interface	Serial, Ethernet, USB
Power	24VDC
Ext 장비	Zigbee Sink-Node

소프트웨어 개발은 JAVA(JRE 1.8.0_45)를 이용하였다. 초기 시리얼 통신과 TCP/IP 통신을 초기화한 후, 센서들과 동기화를 시작하고, 동기화 완료 후에는 센서 노드로부터 받은 데이터를 미들웨어에 보내고 로그를 기록한다. 그림 4에 순서도를 나타낸다.

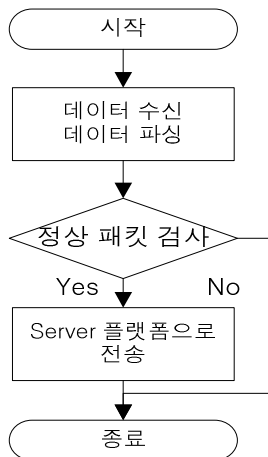


그림 4 게이트웨이 데이터 처리 순서도

Fig. 4 Flowchart of Gateway data processing

2.3 미들웨어 설계

미들웨어는 다수의 게이트웨이로부터 수집된 정보를 종합 관리한다. 또한, 게이트웨이에 직접 사용자 인터페이스가 연결되면 전체적인 시스템 부하가 증가하므로, 미들웨어를 사용하여 부하를 줄이도록 설계하였다. 프로그램 구성은 게이트웨이로부터 데이터를 수신하여 관리하는 프로그램과 사용자 인터페이스(Graphical User Interface)를 구성하는 프로그램으로 되어있다. 데이터를 수신하여 관리하는 프로그램의 개발 환경은 Windows7(x64), 개발 도구는 MFC를 이용하여 설계한다. 그림 5에 순서도를 나타낸다.

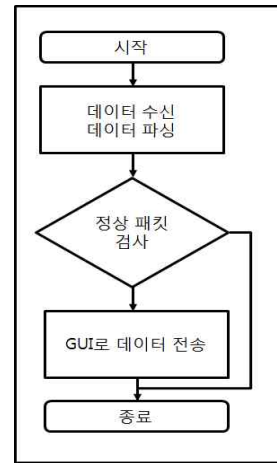
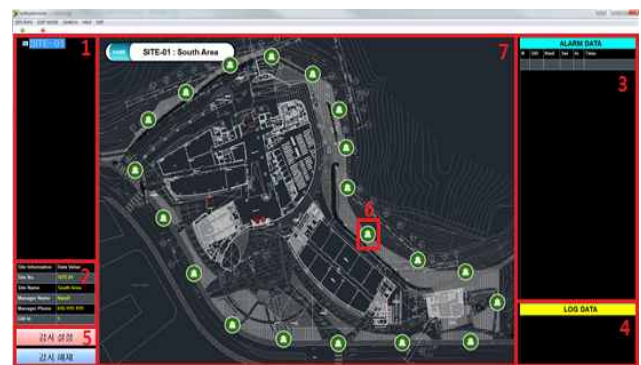


그림 5 미들웨어 데이터 처리 순서도

Fig. 5 Flowchart of Middleware data processing



1. Site List : 현재 저장되어 있는 사이트
2. Site Info. : 지정한 사이트에 대한 정보
3. Alarm Data : 센서 알람을 표시하고 기록
4. Log Data : 미들웨어와 통신에 대한 로그 데이터
5. 감시 On/Off : 센서 감시 시작/종료
6. Icon : 센서 하나에 대한 바로보기
7. 배경화면 : 사이트 배경화면

그림 6 GUI 프로그램 구성화면

Fig. 6 Configuration screen of the GUI program

GUI 프로그램은 하나의 단위로 오브젝트 관리를 위하여 DB에 사이트, 센서 등 설정 정보를 저장하고 실시간으로 모니터링 및 제어가 가능하도록 한다. 또한, 다수의 사이트 관리를 위해 사이트의 추가 및 제거가 가능하도록 한다. GUI 프로그램의 화면 구성을 그림 6에 나타낸다.

2.4 안드로이드 어플리케이션 설계

안드로이드 어플리케이션은 현장에서 개별 센서의 설정 정보를 변경하거나, 모니터링하기 위하여 설계하였으며 흐름도를 그림 7에 나타낸다. 그림 8은 프로그램 실행 예를 나타낸다.

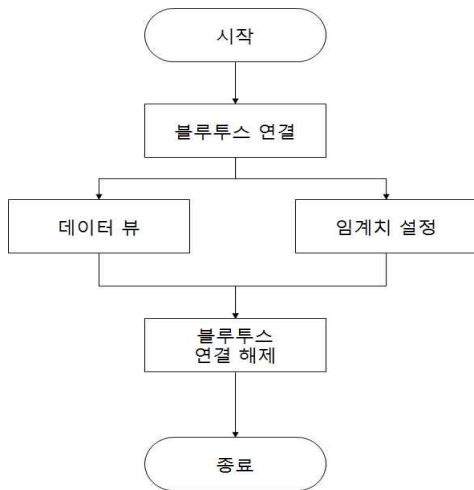


그림 7 안드로이드 어플리케이션의 순서도
 Fig. 7 Flowchart of the Android Application



그림 8 안드로이드 어플리케이션 실행 화면
 Fig. 8 Execution screen of the Android Application

3. 실험 및 결과

본 논문에서 제안한 구조물 안전관리 시스템의 유효성 검증을 위해 센서 노드 20대를 제작하여 실내 구조물에 설치하고, 게이트웨이 1대, 미들웨어 1대를 구성하여 실험하였다. 본 논문에서 설계한 센서 노드의 구조물 변형률 측정 실험결과를 표 2에 나타낸다.

표 2 측정된 전압과 변형률
 Table 2 Measured voltage and strain

측정 전압	변형률	실측 변형률	오차(%)
0.967	0.000693358	0.000723	4.28
1.011	0.000724907	0.00074	2.08
0.977	0.000700528	0.000731	4.35
0.913	0.000654639	0.00067	2.35
2.056	0.001474192	0.001519	3.04
0.991	0.000710566	0.000751	5.69
1.958	0.001403924	0.001434	2.14
1.475	0.001057604	0.001103	4.29
2.061	0.001477777	0.001503	1.71
0.996	0.000714151	0.000764	6.98
1.938	0.001389584	0.0014	0.75
1.035	0.000742115	0.000782	5.37
0.972	0.000696943	0.000702	0.73
1.533	0.001099191	0.001149	4.53
1.084	0.000777249	0.000792	1.9
2.012	0.001442643	0.001463	1.41
1.411	0.001011714	0.001052	3.98
2.07	0.00148423	0.001494	0.66
1.743	0.001249765	0.00128	2.42
1.304	0.000934993	0.000955	2.14
2.319	0.001662768	0.001678	0.92
1.025	0.000734945	0.00074	0.69
2.065	0.001480645	0.001496	1.04

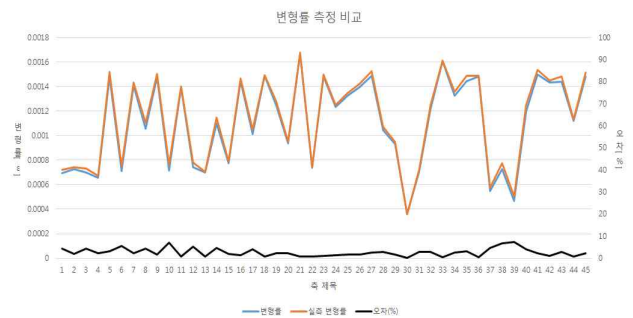


그림 9 측정된 변형률과 계산된 변형률 비교
 Fig. 9 Comparison of measured and calculated strains

표 2의 결과를 그래프로 나타내면 그림 9와 같다. 측정된 변형률과 계산된 변형률의 오차가 최대 7% 이내로, 본 논문에서 설계한 센서 노드로 비교적 정확히 구조물의 변형률 측정이 가능하다고 할 수 있다.



그림 10 스트레인게이지 및 센서 노드 하드웨어
 Fig. 10 Strain gauge and the sensor node hardware



그림 11 게이트웨이 하드웨어
 Fig. 11 Hardware of the Gateway

그림 10과 그림 11에 본 논문에서 실제 제작한 센서 노드와 게이트웨이 하드웨어를 나타낸다.

센서 정보 수집의 정확성과 무선 통신의 신뢰도의 실험에서는 시간 동기를 맞춘 후 일정 시간(64초로 설정) 마다 센서 정보를 받았을 때 100회 반복 결과 센서 정보가 100회 전부 수집되었으며, 서버 PC로 데이터 전송이 전부 수신 됐음을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서 설계한 센서 정보수집과 무선 통신의 신뢰도는 매우 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 또한, 센서 노드 내부에 설정 정보로 가지고 있는 위험상황에 대한 인지 응답 실험에서는 센서 노드의 설정한 임계치 이상으로 변형을 주어 변화시켰을 때, 알람 로그창에 알람 메시지가 송출되며, 알람 로그 메시지와 수신된 시간의 차이는 5초 이내로 들어오는 것을 그림 12의 GUI 프로그램에서 확인하였다. 센서의 변형률 값이 사용자가 미리 설정한 민감도에 따라 색이 변하도록 하여 하나의 사이트에서 센서 노드의 실시간 모니터링이 가능하여 임계치가 넘을 경우에 알람을 발생하도록 할 수 있다.

그림 13은 GUI 프로그램에서 아이콘을 클릭하면 해당 센서



그림 12 GUI 프로그램의 실시간 모니터링
 Fig. 12 Realtime monitoring of the GUI program

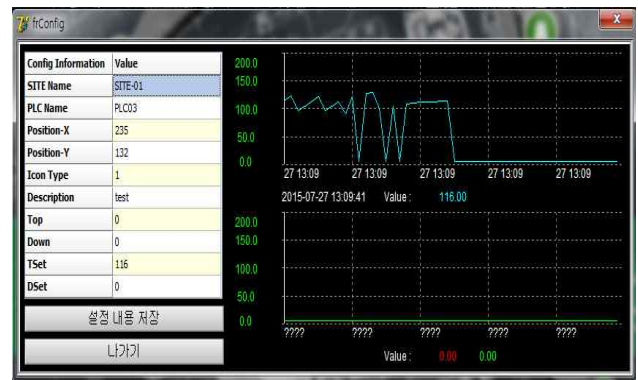


그림 13 센서 노드의 실시간 모니터링
 Fig. 13 Realtime monitoring of the sensor node

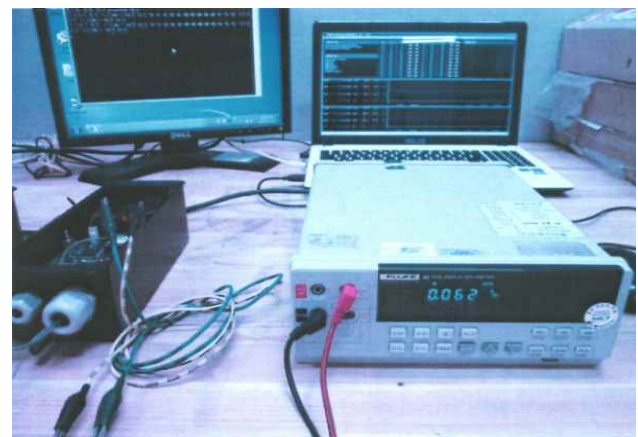


그림 14 센서 노드의 무선 송신 시의 소비 전류 측정
 Fig. 14 Power consumption measurement of the sensor node wireless transmission

노드의 속성 정보를 실시간으로 모니터링 및 설정 정보를 변경할 수가 있음을 나타낸다.

센서 노드의 가장 중요한 부분 중 하나인 소비전력 실험에서는 대기 상태의 소비 전류는 $0.2[\mu A]$, 무선 송신 시는 $62[mA]$ 로 측정되었다. 그림 14는 무선 송신 시 사용된 소비 전류를 측정한 그림이다. 실험에서 $3.6V$ $2400[mAh]$ 리튬배터리를 사용하였으며, 무선 송신의 간격은 64초이며, 0.1초 내에 송신이 완료된다. 1시간 당 소비 전류량은 대기상태와 동작 상태를 더한 $0.009499[mAh]$ 가 되며, 1년간 소비 전류는 $83.21124[mAh]$ 이다. 따라서, 배터리의 수명[8]은 약 28.8년이 되고 연간 자가 방전률을 고려하면 대략 20년 사용이 가능하다.

4. 결 론

본 논문에서는 USN기반 구조물 안전관리 시스템을 위한 센서 노드와 게이트웨이, 미들웨어 서버 시스템을 제안하고, 제한한 시스템의 현장 적용 가능성을 검증하기 위하여 센서 노드 20개와, 게이트웨이 1대, 미들웨어 서버 1대로 구성하여 실험하였다. 센서 정보 수집의 정확성과 무선 통신의 신뢰도의 실험에서는 시간 동기를 맞춘 후 64초 단위로 센서 정보를 0.1초간 무선 송신하는 것을 100회 반복하여 송신한 결과 100회 전부 수신 되었으며, 서버 PC로 데이터 전송이 전부 수신 됐음을 확인하였다. 센서 노드에 발생한 위험상황에 대한 인지 응답 실험에서는 센서 노드의 설정한 임계치 이상으로 변형을 주었을 때, 미들웨어 서버의 GUI 프로그램 알림 로그창에 알림 메시지가 5초 이내로 들어오는 것을 확인하였다. 또한, 센서 노드의 소비전력 실험에서는 $3.6V$ $2400[mAh]$ 리튬배터리를 사용하여 약 20년 사용이 가능한 것을 확인하였다.

USN기반 구조물 관리 시스템은 지속적으로 발전하고 있으며, 취약 지역에 대한 모니터링 뿐 아니라 미들웨어가 센서 네트워크에서 발생한 이벤트들을 효율적으로 처리하고 관리하며, 공간내의 상황을 고려한 지능적이고 복합적인 상황정보를 분석 가공하는 고도화된 서비스 제공도 가능할 것이다. 또한, 산업 환경 안전을 위하여 작업자가 착용한 스마트 기기뿐만 아니라 스마트 u-센서 노드를 기반으로 위치 정보 및 작업장 환경 정보를 이용한 미들웨어 기술을 활용하여 스스로 재해예방이 가능한 향상된 안정성은 물론 생산성 향상을 위한 보다 지능적인 서비스 제공도 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(과제번호-520150450).

References

- [1] In Su Jung, "The Reinforcement Plan of Safety Management for the Small-sized Facility", *Journal of the Korean Society of Safety*, vol. 29, no. 6, pp. 111-118, 2014.
- [2] Eun Jin Kim, Su Jin Cho and Sung Han Shin, "A Recent Research Summary on Smart Sensors for Structural Health Monitoring", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, vol. 19, no. 3, pp. 10-12, 2015.
- [3] J. Pal and S. Banerjee, "A combined modal strain energy and particle swarm optimization for health monitoring of structures", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, pp. 353-363, 2015.
- [4] Sang-Seok Kim, Jang-Sik Park, Seok-Jo Ko and Hee-Jeong Ro, "Design and Development of Strain Measurement System Based on Zigbee Wireless Network", *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 3, pp. 585-590, 2012.
- [5] P. Bielen, M. Lossie and D. Vandepitte, "A Low Cost Wireless Multi-channel Measurement System for Strain Gages", *Proceedings of ISMA2002*, vol. 2, pp. 663-670, 2002.
- [6] Se Hyun Park, Kyo Min Ku and Kyeoung-Ju Ha, "Mobile Information System using Zigbee Technology", *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, vol. 19, no. 2, pp. 67-72, 2014.
- [7] G. Feltrin, N. Popovic, K. Klouri and P. Pietrzak, "A Wireless Sensor Network with Enhanced Power Efficiency and Embedded Strain Cycle Identification for Fatigue Monitoring of Railway Bridges", *Journal of Sensors*, vol. 2016, pp. 1-14, 2016.
- [8] Hyun Kim, Chang-Soon Shin and Hyun-Chol Shin, "Battery Lifetime Estimation Considering Various Power Profiles in Wireless Sensor Node", *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 46, no. 12, pp. 111-118, 2009.
- [9] Ju-Sang Maeng, "Structures Transform Management System Design based on USN", Master Thesis, Kangwon National University, 2016.

저 자 소 개



맹 주 상 (Ju-Sang Maeng)

1990년 10월 17일생. 2016년 강원대학교 전자통신공학과 석사졸업.



김 일 환 (Il-Hwan Kim)

1959년 12월 18일생. 1982년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1988년 서울대학교 제어계측공학과 석사졸업. 1993년 Tohoku University 졸업(Ph.D.). 1995. 3~현재 강원대학교 전기전자공학부 교수