한국정밀공학회지 제 28권 2호 pp. 176-184 February 2011 / 176
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 28, No. 2, pp. 176-184

능동형 텔레매트릭스를 위한 IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서 시스템의 구현

Implementation of IEEE 1451 based ZigBee Smart Sensor System for Active Telemetrics

이석[1], 송영훈[1], 박지훈[1], 김만호[1,✉], 이경창[2]
Suk Lee[1], Young Hun Song[1], Jee Hun Park[1], Man Ho Kim[1,✉] and Kyung Chang Lee[2]

1 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)
2 부경대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National Univ.)
✉ Corresponding author: kmh@pnu.edu, Tel: 051-510-3091

Manuscript received: 2010.7.7 / Revised: 2010.10.8 / Accepted: 2010.12.2

As modern megalopolises become more complex and huge, convenience and safety of citizens are main components for a welfare state. In order to make safe society, telemetrics technology, which remotely measures the information of target system using electronic devices, is an essential component. In general, telemetrics technology consists of USN (ubiquitous sensor network) based on a wireless network, smart sensor, and SoC (system on chip). In the smart sensor technology, the following two problems should be overcome. Firstly, because it is very difficult for transducer manufacturers to develop smart sensors that support all the existing network protocols, the smart sensor must be independent of the type of networking protocols. Secondly, smart sensors should be modular so that a faulty sensor element can be replaced without replacing healthy communication element. To solve these problems, this paper investigates the feasibility of an IEEE 1451 based ZigBee smart sensor system. More specifically, a smart sensor for large network coverage has been developed using ZigBee for active telemetrics.

Key Words: Telemetrics (텔레매트릭스), USN (Ubiquitous Sensor Network; 유비쿼터스 센서 네트워크), Smart Sensor (스마트 센서), IEEE 1451, ZigBee, TII (Transducer Independent Interface), STIM (Standard Transducer Independent Module), NCAP (Network Capable Application Processor)

1. 서론

최근에, 산업이 급격하게 발전하면서 산업 시설과 거주 환경이 도시를 중심으로 대형화되고 집적화되고 있다.[1] 또한, 국가 경제력이 증가되면서 편리하고 안전한 주거 환경이나 문화 생활을 영위할 수 있는 공공 시설과 같이 삶의 질을 향상시키는 문제에 대한 관심이 증가하고 있다. 하지만, 심각한 기후의 변화로 인하여 빈번하게 발생되는 재해 및 재난 사고나 인간의 실수에 의해서 발생되는 인재는 편안하고 안전한 삶에 치명적인 위협을 주고 있다.[2] 특히, 고도로 집적화된 대도시에서 대구 지하철 사고와 같은 재해 및 재난에 의한 사고가 발생할 경우에는 엄청난 사회적 손실과 개인의 고통뿐만 아니라 국가신임도까지 영향을 줄 수 있다.

재해 및 재난을 실시간으로 예측하고 대응하는 대표적인 기술에 텔레매트릭스(telemetrics)가 있다. 텔레매트릭스는 원격(tele), 계측(metry)과 전자(electronics)의 세 단어를 합성하여 만든 용어이다. 재해 혹은 재난 대상의 정보를 원거리에서 그림 1과 같이 실시간으로 획득하여 분석하고, 대상의 상태를 추정하여 원하는 방향으로 제어하는 기술을 의미한다.[3] 텔레매트릭스의 핵심은 USN (ubiquitous sensor network)으로 대표되는 무선 기반 근거리 및 원거리 센서 통신 기술, IEEE 1451로 대표되는 스마트 센서(smart sensor) 기술과 수집된 정보를 이용하여 서비스를 제공하는 기술이다.[4] 즉, 원거리에서 칩으로 집적화 된 무선 스마트 센서를 이용하여 원격에서 원하는 시스템을 제어하는 기술이며, 최대한 작게 하고 저가, 저전력을 만족해야 한다. 텔레매트릭스는 도시의 전력 및 가스 배관의 부식과 누수를 측정하는 분야에서 바다의 파도 높이나 해수면의 온도를 측정하는 분야까지 다양하게 적용되고 있다. 최근에는, 재해 및 재난에 대한 분야뿐만 아니라 지능형 빌딩의 실내 환경을 제어하거나 항만의 물류 시스템을 제어하는 분야까지 적용이 확대되고 있다.

텔레매트릭스의 발전과 함께 많은 연구자에 의해서 관련된 연구가 수행되고 있다. 미국의 ORNL(oak ridge national laboratory)는 계측용 센서를 비롯하여 센서 네트워크 기술을 개발하였다.[5] UC 버클리 대학은 대규모 센서 네트워크를 구축하고 실시간 계측을 위하여 극소형의 센서들 간의 애드혹(ad-hoc) 통신인 PicoRadio를 개발하였다.[6] UCLA 대학은 초소형 환경 감시용 영상 센서 네트워크인 WINS(wireless integrated network sensors)에 대한 기반기술 및 인터넷 접속 환경을 개발하였다.[7] EU에서는 소형의 내장형 칩을 삽입하여 정보를 수집하여 분석하는 정보 인공물을 개발하여 지능화된 사물간의 통신이 가능하게 하는 Smart-ITS 연구를 수행하였다. 일본은 u-Japan 전략 차원에서 텔레매트릭스에 대한 연구를 수행하고 있으며 다양한 비즈니스 모델을 제시하여 요소 기술을 개발하고 있다.[8] 또한, 전기연은 부식 감시용 텔레매트릭스 기술을 개발하기 위하여 센서 네트워크 기술과 스마트 센서 원천 기술을 개발하고 있다.[9]

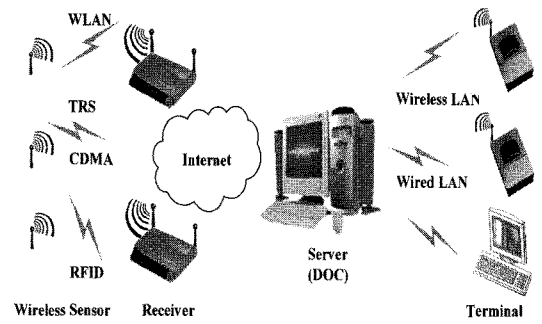


Fig. 1 Structure of active telemetrics system

하지만, 기존의 스마트 센서 연구에는 세가지 문제점을 가지고 있다. 우선, 기존의 스마트 센서는 많은 프로토콜 중에서 특정 프로토콜만을 지원하는 네트워크 센서(network sensor)라는 단점을 가지고 있다.[10] 예로, 기존의 대다수의 스마트 센서는 ZigBee 통신을 지원하는 네트워크 센서로서, 다른 통신을 사용하기 위해서는 다른 통신을 지원하는 프로토콜 컨트롤러를 추가로 내장해야 된다는 문제점을 가진다. 다음으로, 기존의 스마트 센서는 고가인 마이크로 컨트롤러와 네트워크 컨트롤러가 일체형으로 통합된 구조를 채택하여 보수성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 즉, 기존의 스마트 센서는 센서나 통신을 위한 트랜시버(transceiver)가 고장 나면, 고가의 마이크로 컨트롤러가 포함된 스마트 센서 전체를 교체해야 하기 때문에 교체 비용이 많이 들 수 밖에 없다. 마지막으로, 텔레매트릭스는 무선 통신을 기반으로 센서의 정보를 전송하지만, 기존의 스마트 센서 연구는 유선 통신을 기반으로 수행되고 있다. 유선 통신과 무선 통신은 통신 방법 및 통신 환경이 다르기 때문에 유선 통신 기반의 스마트 센서를 무선 통신 기반의 스마트 센서로 변경할 경우에는 많은 시간과 비용의 추가로 발생할 수 있다.

따라서 센서 모듈과 네트워크 모듈을 독립적으로 설계할 수 있도록 두 모듈간의 표준 인터페이스를 정의한 IEEE 1451을 이용한 무선 형태의 스마트 센서 설계 기술이 텔레매트릭스의 핵심 기술로 중요성이 커지고 있다.[11-13] 본 논문은 능동형 텔레매트릭스를 위하여 IEEE 1451 기반 무선 스마트 센서를 제안한다. 특히, 통신부는 무선 센서 네트워크에 사용되는 ZigBee를 기반으로 통신할 수 있도록 IEEE 1451.1을 기준으로 설계하고 센서부는 IEEE 1451.2 표준 인터페이스를 기준으로 설계하고 구현하였다. 또한, IEEE 1451 기반 스마트 센서의 성능은 테스트베드를 구성하는 스마트 센서의 노드 수에 따라 무선 통신으로 전송하는 최대

전송 지연, 평균 전송 지연과 plug-and-play 지연으로 평가하였다.

본 논문은 서론을 포함하여 5 장으로 구성되어 있다. 2 장에서는 텔레매트릭스 요소 기술 및 IEEE 1451 표준 개요에 대해 설명하고, 3 장에서는 IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서의 구조와 구현 방법을 설명한다. 4 장에서는 IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서의 성능을 평가하고, 5 장에서 결론과 향후 과제를 제시하였다

2. 텔레매트릭스 요소 기술 및 IEEE 1451 표준 개요

2.1 텔레매트릭스 요소 기술

텔레매트릭스의 핵심 요소 기술은 정보를 수집하는 센서 및 센서 모듈 기술, 수집된 정보를 전송하기 위한 통신 기술과 전송 받은 정보를 이용하여 제어 서비스를 제공하는 기술로 구성된다. 센서 및 센서 모듈 기술은 계측 대상의 상태를 신뢰성 있게 측정하는 것이 핵심이다. 즉, 계측 대상의 상태를 신뢰할 수 있는 수준에서 지속적으로 정확하게 출력할 수 있는 기술을 의미한다. 텔레매트릭스에서 주로 사용되는 센서는 온도, 압력, 충격, 오염, 파괴, 화재 등의 상태를 감지하는 정보 센서, 영상을 감지하는 영상 센서와 정보 센서와 영상 센서가 연계된 지능형 융합센서가 있다. 센서 모듈 기술은 수집된 센서의 정보를 수집하여 근거리 수집장치에 전송하는 기능을 포함하고 있으며, 추가적인 인프라의 구축이 없이 전송이 가능한 저전력 통신이 요구된다.

수집된 정보를 전송하는 통신 기술은 센서의 정보를 유무선 통신망을 통하여 중앙의 관제센터에 전달하는 양방향 통신으로 무선과 유무선 통합 통신 방식으로 구분된다. 센서용 무선 통신 기술은 협대역(1-10kbps) 전송을 목적으로 정보 센서용 수집장치, 무선 중계 모뎀, 무선 중계기 및 통합 기지국 장치 등이 있다.[14] 센서용 유무선 통합 통신 방식은 유선 광통신장치를 무선과 융합하여 센서 전용으로 특화 한 장치로 영상 센서 통신용으로 사용되며 광대역(10-100Mbps) 전송을 목적으로 영상 센서용 코덱장치, 유무선연동 게이트웨이, 다중접속 광통신장치 등이 있다.[14] 근거리 통신 기술에는 저전력 기반 센서 네트워크 기술, 자기 진단 및 복구 기술과 IEEE 1451 기반 양방향 중계 기술 등이 포함된다. 원거리 통신 기술에는 광대역 유무선 통신 기술과 신호 처리를 포함한 데이터 관리 기술 등이 포함된다.[15]

제어 서비스를 제공하는 기술은 영상 정보를 포함하여 전송 받은 정보를 분석하고 가공하여 원격지 시설물의 상태를 추정하여 통합 관리하는 것이다. 특히, 원격지의 시설물을 통합 관리하기 위한 중앙센터는 시설물의 상태를 정확히 판단할 수 있는 진단 알고리즘과 원격에서 시설물에 적절한 상태를 유지할 수 있는 제어 정보를 송신하는 기술을 포함한다. 통합 관리 제어를 위해서는 제어 관리용 소프트웨어, 지능형 센서 지원 미들웨어, 센서 정보 보안인증 솔루션, 데이터 분석 솔루션 및 텔레매트릭스 응용 애플리케이션 등을 필요하다.[15]

2.2 IEEE 1451 표준 개요

텔레매트릭스의 핵심 요소 기술인 IEEE 1451 표준은 미국의 NIST(national institute of standards and technology)와 IEEE(electrical and electronics engineers)에 의해서 1993 년부터 진행되었으며, 1997 년에 IEEE 1451 표준을 발표하였다.[10,16] IEEE 1451 은 IEEE 1451.1 에서 5 까지 표준이 제정되었으며, IEEE 1451.7 표준이 곧 제정될 것으로 알려져 있다. 최근에 출판된 IEEE 1451.0 표준은 IEEE 1451.1 이나 IEEE 1451.2 이후에 출판된 표준들의 개발 과정에서 표준들의 통일성을 유지하기 위하여 개발되었으며, 표준으로 지원하는 TEDS(transducer electronic data sheet)의 구조, IEEE 1451.1 과 IEEE 1451.x 사이의 계층적 프로토콜 스택(layered protocol stack) 및 트랜스듀스에 대한 기본적인 명령어 집합을 정의한다. IEEE 1451.1(1999 년) 표준은 NCAP(network capable application processor)의 소프트웨어 모델을 정의한다. IEEE 1451.2(1997 년) 표준은 트랜스듀서 및 NCAP 간의 하드웨어 통신 채널에 대해 최초로 정의하고, 하나의 NCAP 과 하나의 STIM(smart transducer interface module)이 연결되는 구조를 정의하였다. IEEE 1451.3(2003 년) 표준은 하나의 NCAP 에 여러 개의 TBIM(transducer bus interface module)이 연결되는 버스 구조의 하드웨어 인터페이스에 대한 표준을 제정하였다. IEEE 1451.4(2004 년) 표준은 아날로그 및 디지털 신호가 동일한 하드웨어 라인을 공유하는 MMI(mixed mode interface)를 정의하였다. IEEE P1451.5 표준은 트랜스듀서와 NCAP 사이의 무선 인터페이스 연결에 대하여 정의하였다. IEEE P1451.7 표준은 표준화

작업이 진행 중이며, 센서와 액츄에이터 트랜스듀서의 RFID(radio frequency identification)시스템의 통신 프로토콜에 대한 인터페이스를 정의한다.

스마트 센서를 구성하는 데 있어서 핵심적인 부분인 IEEE 1451 은 STIM 과 NCAP 으로 구성되어 있다. STIM 은 트랜스듀서와의 인터페이스, 신호 변환 그리고 신호 처리 기능을 수행한다. 즉, STIM 은 트랜스듀서(XDCR)로부터 아날로그 신호를 측정하고, 측정된 아날로그 신호를 A/D 변환기(ADC)를 이용하여 디지털 데이터로 변환하고, 이를 NCAP 으로 전달한다. 그리고, NCAP 으로부터 전달받은 디지털 데이터를 D/A 변환기(DAC)를 이용하여 아날로그 신호로 변환한 후 트랜스듀서에 전달하는 역할도 함께 수행한다.[12]

반면, NCAP 은 STIM 에서 받은 데이터를 연산처리한 후 네트워크를 통하여 디지털의 형태로 전송하는 기능을 수행한다. NCAP 과 STIM 은 데이터 전송을 위한 디지털 인터페이스를 정의한 TII(transducer independent interface)를 이용하여 서로 통신을 수행한다. 특히, NCAP 은 초기화될 때, STIM 내부에서 트랜스듀서의 종류나 보정 데이터와 같은 센서에 관한 정보를 저장하고 있는 TEDS 를 통하여 트랜스듀서에 대한 정보를 읽어오게 된다. 이러한 방법에 의하여, IEEE 1451 에서는 NCAP 을 초기화하거나 STIM 을 교체하더라도 NCAP 은 TEDS 로부터 센서에 대한 정보를 읽게 됨으로써, 관리자의 특별한 보정 없이도 즉시 스마트 센서의 사용이 가능하게 된다.[11]

트랜스듀서의 특성을 기술하는 TEDS 는 모든 트랜스듀서에 있어서 공통적인 정보를 포함하는 하나의 Meta-TEDS 와 각 트랜스듀서에 관한 정보를 포함하는 하나 이상의 Channel-TEDS 및 Calibration-TEDS 로 구성되어 있다. 여기서, Meta-TEDS 는 구현된 채널의 수, 최악의 경우에서의 타이밍 값과 지원할 수 있는 데이터 전송 속도 등에 대한 정보가 저장되어 있으며, Channel-TEDS 는 채널의 종류(센서 또는 액츄에이터), 데이터의 임계값, 각 채널의 타이밍 값 등에 대한 정보를 가지고 있다. 마지막으로, Calibration-TEDS 에는 보정 곡선의 특성 값과 같은 보정에 필요한 정보들이 저장되어 있다.

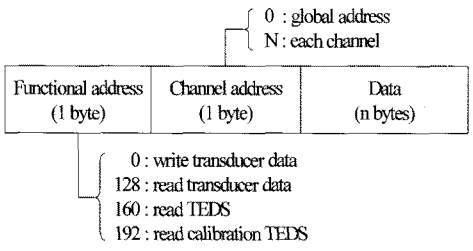


Fig. 2 Layout of the frame exchanged between the STIM and NCAP

STIM 과 NCAP 간에 주고 받는 모든 데이터는 그림 2 와 같이 기능 주소와 채널 주소, 전송할 데이터의 형식을 가진 프레임으로 정의되어 있다.[11] 여기서, 기능 주소에는 STIM 이 실행할 기능과 TEDS 또는 트랜스듀서의 읽기나 쓰기에 관련된 기능들이 정의되어 있다. 그리고, 채널 주소에는 STIM 에 붙어 있는 각 채널들 중 어느 채널을 선택할 것인가에 대한 정보가 정의되어 있다. 기능 주소가 0 인 경우에는 트랜스듀서에 데이터를 쓰는 명령이며, 128 인 경우에는 트랜스듀서로부터 데이터를 읽는 명령이다. 마지막으로, 데이터의 길이는 기능 주소와 채널 주소에 따라 정해지는 기능에 따라 유동적으로 변한다.

그림 3 은 STIM 과 NCAP 간의 일기/쓰기 프레임의 전송 방법을 나타내고 있다.[11] 먼저, NCAP 이 NIOE 주장(assert) 신호를 STIM 에게 보내면, STIM

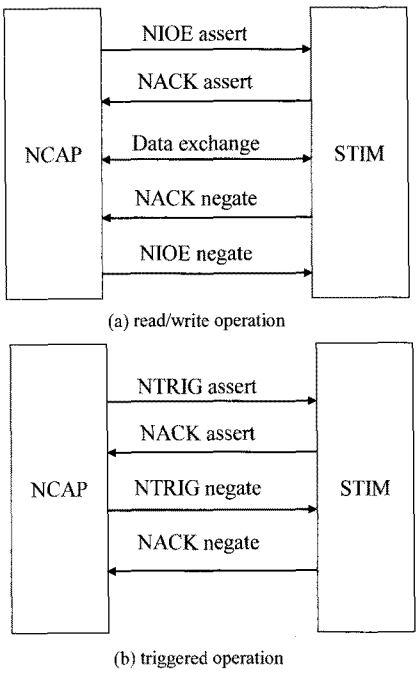


Fig. 3 Layout of the frame exchanged method between the STIM and NCAP

은 보내야 될 데이터가 있는 경우에 NACK 주장 신호를 NACP 으로 보낸다. 그리고 나서, NCAP 과 STIM 은 TII 를 이용하여 데이터를 교환한다. 데이터의 교환이 끝나게 되면, STIM 은 NACK 무효 (negate) 신호를 NCAP 으로 보내고, NCAP 은 NIOE 무효 신호를 STIM 에게 보내어 읽기/쓰기 프레임의 전송이 종료하게 된다. 트리거 신호를 보내는 경우의 NCAP 은 NTRIG 주장 신호를 STIM 으로 보낸다. 그리고 나서, STIM 은 트랜스듀서를 트리거하고 나서, NACK 주장 신호를 NCAP 으로 전송한다. 그 신호를 받은 NCAP 은 NTRIG 무효 신호를 STIM 에게 보내고, NCAP 은 NACK 무효 신호를 STIM 에게 보내어 트리거 신호의 전송이 종료하게 된다.

3. IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서 시스템 설계

일반적으로, 스마트 센서는 트랜스듀서의 측정 기능과 A/D 나 D/A 와 같은 신호 변환 기능, 데이터 처리 및 전송 기능 등이 하나의 모듈에 통합되어 네트워크에 접속되는 구조로 설계된다. 하지만, IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서는 그림 4 와 같이 신호 측정 및 변환 기능과 데이터 처리 및 전송 기능은 각각 STIM 과 NCAP 으로 분리되어 있으며, 두 개의 모듈은 TII 에 의하여 연결되어 설계된다. 제안된 방법에 의하여, STIM 을 포함하는 트랜스듀서는 NCAP 에 의해 구현되는 네트워크 트랜시버에 관계없이 운영이 가능하다. 즉, 계측을 위한 STIM 과 네트워크 전송을 위한 NCAP 을 독립적으로 설계함으로써 STIM 은 TII(IEEE 1451.2) 표준만 준수한다면 텔레매트릭스 환경에서 사용하는 네트워크 프로토콜의 종류와 무관하게 개발할 수 있다.

IEEE 1451.2 표준에 따른 텔레매트릭스를 위한 스마트 센서의 NCAP 기본 동작절차는 다음과 같다.[11,17] 우선, NCAP 은 STIM 이 연결되기 전까지는 NSDET 핀을 지속적으로 모니터링 하면서 STIM 이 연결되기를 기다린다. NSDET 핀이 감지되면 STIM 에 전원(+5V)을 공급하고, 초기화 명령을 전송한다. 표준 명령어를 이용하여 STIM 초기화 명령을 전송한 후, 일정 시간 동안 STIM 이 초기화되기를 기다린다. 그 시간이 경과되면 현재 연결된 STIM 의 종류, 신호레벨, 센서범위, 샘플링 주기 등의 정보를 가지고 있는 TEDS 를 읽어 와서 메모리에 저장하게 된다. 이후 센서의 정보를 수집하기 위해 NTRIG 핀을 active 상태로 천이시키는 트리거를 하고 STIM 으로부터 계측이 완료되었다는 응답인 NACK 를 기다린 후, NACK 가 감지되면 센서 값을 읽고 그렇지 않다면 다시 트리거를 해서 STIM 의 응답을 기다리게 된다. 이후 NCAP 은 TEDS 의 정보를 바탕으로 샘플링 주기마다 트리거를 해서 센서의 정보를 업데이트하고 네트워크로 전송하게 된다.

IEEE 1451 표준에 따른 텔레매트릭스를 위한 스마트 센서의 STIM 의 기본 동작절차는 다음과 같다.[11] 우선 전원이 인가되면 NCAP 으로부터 STIM 초기화 명령을 기다리게 된다. STIM 초기화 명령을 수신하면 STIM 은 A/D 변환기, GIO, 타이머 등을 초기화하고 TEDS 를 전송하기 위한 준비를 하게 된다. 명령을 기다리는 상태에서 표준에서 정하고 있는 특정명령을 수신하게 되면 해당 기능을 수행(Read Meta-TEDS, Read Data 등)하고 다시 명령을 대기하는 상태로 돌아가며, NTRIG 핀이 동작 상태로 감지되면 트랜스듀서를 샘플링 해서 NCAP 으로 전송하기 위한 준비를 한다. 이러한 NCAP 과 STIM 의 동작절차는 IEEE 1451.2 표준에서 정의하고 있는 TII 의 규정을 준수하고 있으며, 이를 통해서 NCAP 과 STIM 의 독립적인 동작할 수 있다.

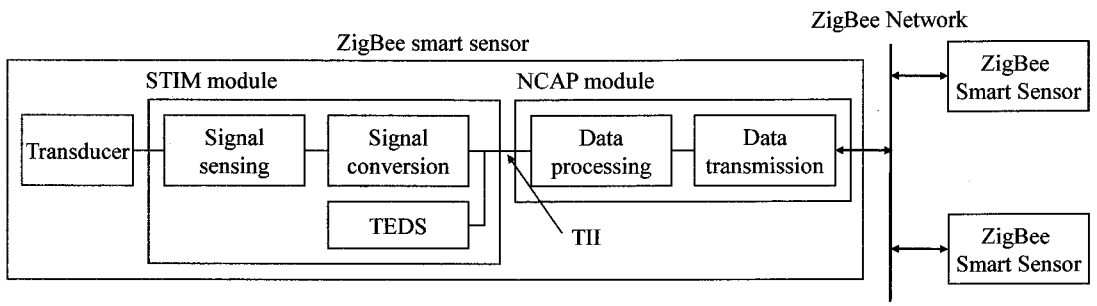
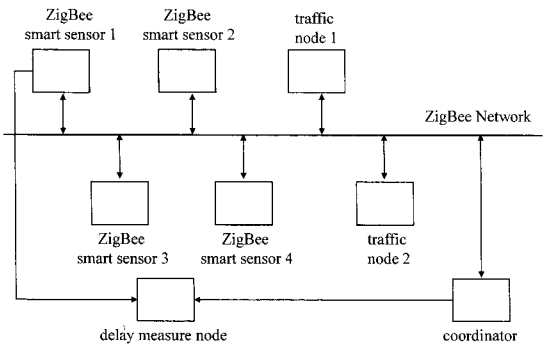


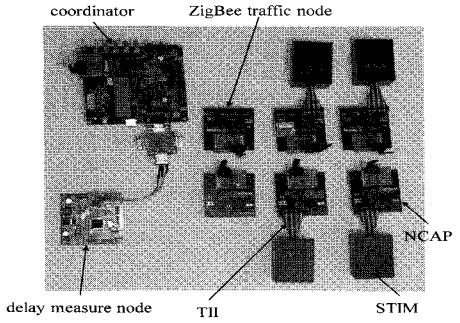
Fig. 4 Schematic structure of IEEE 1451 based ZigBee smart sensor system

4. IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서 시스템 성능평가

IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서 시스템의 성능을 평가하기 위하여 그림 5 와 같은 가상의 텔레매트릭스 실험 환경을 구축하였다. 그림 5(a)는 IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서 시스템의 실험 환경의 구조를 나타내고 있다. 그림에서, 실험 환경은 NCAP 과 STIM 구조로 구현된 4 대의 IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서, 2 대의 트래픽 발생 ZigBee 노드, 1 대의 무선 노드 코디네이터 (coordinator), 전송지연 측정 모듈로 구성되어 있다. 그림 5(b)는 구축한 실험 환경을 나타내고 있다. 실험 환경에서 IEIE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서는 Texas Instrument 사의 CC2431EM 모델과 ㈜오토닉스사의 디지털 압력 센서를 사용하였다. 네트워크 구조를 구성하는 무선 노드 코디네이터는 Texas Instrument 사의 CC2431EM 모델을 사용하였다. 전송 지연 측정 노드는 AT90CAN MCU 를 사용하여 자체 제작하였으며, 스마트 센서에서 발생



(a)Schematic diagram of the experimental testbed



(b)Implementation details for the experimental testbed

Fig. 5 Experimental testbed of IEEE 1451 based ZigBee smart sensor system

되는 I/O 인터럽터를 이용하여 지연을 측정한다. 여기서, 전송 지연은 ZigBee 스마트 센서가 메시지를 전송하는 시점과 코디네이터에서 메시지를 수신할 때 각각 발생되는 I/O 인터럽터 간의 시간의 차이로 정의한다. ZigBee 프로토콜의 전송 속도는 250Kbps 로 설정되었다.

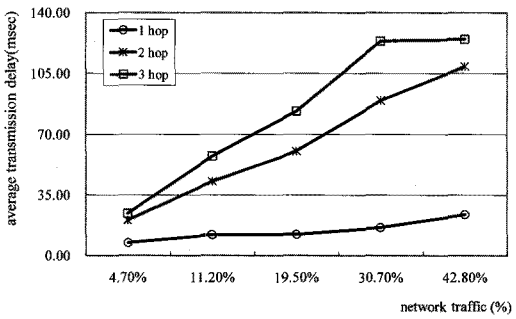
ZigBee 스마트 센서는 100ms 주기로 5byte 데이터를 전송하였으며 트래픽 노드 20ms 주기로 5-72byte 까지 생성되도록 설정하였다. 실험 환경의 트래픽 조건은 4.7-42.8%까지 5 가지 조건으로 생성하였다. 메시지는 전송하는 스마트 센서에서 수신되는 스마트 센서까지 직접 전송하는 방법과 여러 개의 ZigBee 노드를 거쳐서 전송되도록 설정하였다. 여기서, 여러 개의 ZigBee 노드의 안테나 출력은 -57.12dB 로 설정하였으며, ZigBee 노드 사이의 거리는 70cm 로 설정하였다. 각각의 실험에서 메시지는 총 300 개씩 전송하여 측정한 값을 통계적으로 처리하여 표시하였다.[18]

그림 6 은 IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서 시스템의 전송지연 실험결과를 나타내고 있다. 그림 6(a)에서, 하나의 ZigBee 노드를 이용하여 메시지를 전송하는 경우에는 평균전송지연이 23.61 msec(표준편차: 17.75)로 상당히 낮은 것을 확인하였다. 메시지를 3 개의 ZigBee 노드를 이용하여 전송하는 경우에도 평균전송지연이 124.63msec(표준편차: 57.81)로 낮은 것을 확인하였다. 텔레매트릭스에서 요구되는 전송 지연이 1 초이므로, 본 논문에서 제안한 IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서 시스템이 요구되는 성능 조건을 만족함을 확인하였다.[19] 특히, ZigBee 스마트 센서의 안테나 출력을 실험 조건(-57.12dB)에서 정상적인 출력 조건(0dB)으로 할 경우 하나의 ZigBee 노드에서 다른 ZigBee 노드까지 전송거리가 약 100m 이상 증가하기 때문에 거리에 의한 전송 지연이나 설치의 문제점도 함께 해결될 수 있다는 장점을 가진다.

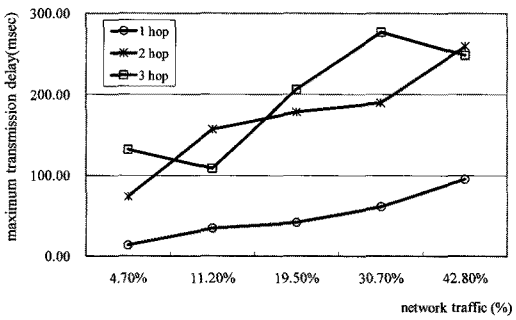
그림 6(b)에서, 하나의 ZigBee 노드를 이용하여 메시지를 전송하는 경우에는 최대전송지연이 96.40msec 로 확인하고, 메시지를 3 개의 ZigBee 노드를 이용하여 전송하는 경우에도 최대전송지연이 248.30msec 로 확인하였다. ZigBee 무선 통신이 실험 환경에 의해 전송 지연의 차이가 발생하기 때문에 최대전송지연이 상대적으로 높은 값을 가진 것으로 판단된다. 최대전송지연이 평균전송지연보다 약 3 배 전후로 증가하였지만, 텔레매트릭스에서 요구되는 전송지연 조건을 만족함을 확인하였

다. 그림에서, 3 개의 ZigBee 노드를 이용하는 경우 트래픽이 증가하여도 평균 전송지연이 크게 증가하지 않고 최대 전송 지연의 경우 오히려 줄어드는 것을 확인할 수 있는데, 높은 트래픽 환경에서는 반복되는 메시지의 충돌때문에 메시지가 전송되지 못하는 경우가 통계적으로 제외되기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

그림 7 은 IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서의 plug-and-play 지연 성능을 평가한 결과를 나타내고 있다. 그림에서, NSDET 는 STIM 이 NCAP 에 접속했다는 것을 알려주는 신호이며 STIM 이 NCAP 에 접속하면 높은 신호에서 낮은 신호로 변경된다. POWER 는 NCAP 에서 NSDET 가 낮은 신호로 떨어지면 STIM 으로 +5V DC 전원을 인가하는 신호이며 STIM 이 접속되면 전압이 증가한다. NTRIG 는 STIM 트랜서튜서의 정보를 요청하는 신호이다. 여기서, NTRIG 는 STIM 이 없을 때는 중간 값을 가지고 STIM 연결되면 높은 신호를 전송하고 있다가 신호를 요청할 때 낮은 신호를 전송하고 트랜서튜서의 정보를 받으면 다시 높은 신호를 보내는 과정을 반복한다. DOUT 는 트랜서튜서 정보를 8bit 단위로 STIM 에서 NCAP 으로 전송하는 신호이다. 그림에서, plug-and-play 지연은 NTRIG 에서 50.4ms 로 측정이 되었으며, 10 회 동안 반복하여 plug-and-play 지연 측정하여 평균 51.10ms (표준편차: 0.82)의 지연이 발생함을 확인하였다. 즉, STIM 의 고장으로 인하여 새로운 STIM 을 NCAP 이 초기화 과정을 거쳐 정상적으로 동작하는데 약 50.4ms 의 시간 지연이 발생함을 의미한다. 텔레매트릭스의 메시지 전송은 1 초 이내로 전송되면 되기 때문에 약 50ms 의 plug-and-play 지연은 텔레매트릭스의 원격 계측 및 제어 성능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 평가된다.[19]



(a) Average transmission delay



(b) Maximum transmission delay

Fig. 6 Transmission delay result of IEEE 1451 based ZigBee smart sensor system

5. 결론

본 논문은 능동형 텔레매트릭스를 위하여 IEEE 1451 기반 스마트 센서를 제안하였다. 통신부는 무선 센서 네트워크에 사용되는 ZigBee 를 기반으로 통신할 수 있도록 IEEE 1451.1 을 기준으로 설계하고 센서부는 IEEE 1451.2 표준 인터페이스를 기준으로 설계하고 구현하였다. 또한, IEEE 1451 기반의 스마트 센서의 성능은 실험실 환경의 테스트 베드에서 원거리의 스마트 센서가 계측한 정보를 제어 기지 역할의 스마트 센서의 노드 수에 따라 무선 통신으로 전송하는 최대 전송 지연, 평균 전송 지연과 plug-and-play 지연 시간으로 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 본 논문에서 제안한 IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서 시스템은 텔레매트릭스 시스템에서 요구되는 전송지연 범위를 만족함을 확인

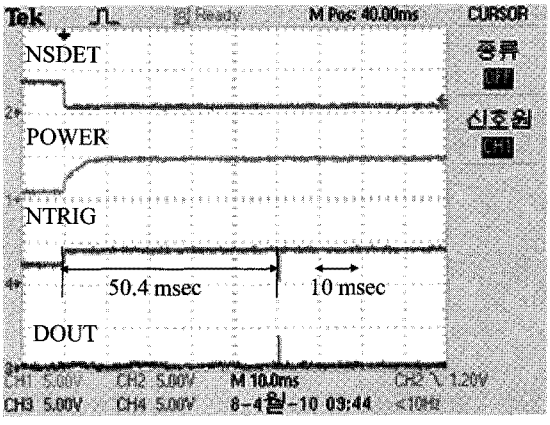


Fig. 7 Plug-and-play result of IEEE 1451 based ZigBee smart sensor system

하였다. 특히, 제한된 범위의 무선 네트워크의 트래픽 환경에서는 만족스러운 전송 성능을 가짐을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서 제안한 IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서 시스템을 적용함으로써 텔레매트릭스를 이용한 원격 모니터링 및 제어 기능을 만족할 수 있음을 확인하였다.

둘째, IEEE 1451 기반 ZigBee 스마트 센서 시스템의 plug-and-play 지연 평가를 통하여 STIM 의 결함이 발생할 경우 NCAP 모듈의 교체없이 STIM 만 교체함으로써 최소한의 비용으로 빠른 시간 내 수리가 가능함을 확인하였다. 특히, NCAP 의 교체에서 발생되는 비용과 교체 시간을 최소화할 수 있음을 확인하였다.

하지만, 본 연구는 몇 개의 ZigBee 노드를 이용하여 간단하게 구현된 실험 환경에서 제안된 시스템의 실현 가능성에 초점을 맞춰서 성능 평가를 수행하였다. IEEE 1451 을 적용하지 않은 네트워크 센서와 비교를 통하여 제안된 스마트 센서가 기존의 센서와 유사한 성능을 가지면서도 추가적인 장점을 가짐을 확인하는 연구가 필요하다. 또한, 대규모의 텔레매트릭스 환경 조건에서 제안된 시스템의 성능을 검증하는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. Park, S. M., "Technical trend of sensor network node platform & OS," Electronics and Telecommunications Trend Analysis, Vol. 21, No. 1, pp. 14-24, 2006.
2. Chae, D. H., Han, K. H., Lim, K. S. and An, S. S., "Sensor network overview and technical trend," Korea Institute of Information Scientists and Engineers, Vol. 22, No. 12, pp. 5-12, 2004.
3. Lee, D. C., "Trend of telemetrics based power equipment status watching system," Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 21, No. 6, pp. 28-34, 2007.
4. Kim, J. H., Lee, Y. I., Hur, H. S. and Hong, Y. S., "An efficient transmission of sensed data in a telemetrics system," Korea Information Processing Society Spring Conference, pp. 1267-1270, 2005.
5. Oak Ridge National Laboratory, http://www.ornl.gov
6. Guo, C., Zhong, L. and Rabaey, J., "Low power distributed MAC for ad hoc sensor networks," Global Telecommunications Conference, pp. 2944-2948, 2001.
7. Vardhan, S., Wilczynski, M., Portie, G. J. and Kaiser, W. J., "Wireless integrated network sensors (WINS): distributed in situ sensing for mission and flight systems," Aerospace Conference Proceedings, pp. 459-463, 2000.
8. Lee, W. B., Ro, T. H. and Bae, J. H., "Electronics and telecommunications policy of Japan: u-Japan," Collection of Society Science, Vol. 14, No. 4, pp. 183-211, 2006.
9. Korea Electrotechnology Research Institute, "Telemetrics Industry Road Map," 2004.
10. Lee, K. C. Kim, M. H., Lee, S. and Lee, H. H., "IEEE-1451-based smart module for in-vehicle networking systems of intelligent vehicles," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 6, pp. 1150-1158, 2002.
11. Song, E. Y. and Lee, K. B., "An interoperability test system for IEEE 1451.5-802.11 standard," Sensors Applications Symposium, pp. 183-188, 2010.
12. Franzl, R. and Gurkan, D., "Implementation of an IEEE 1451.1 compatible multiple NCAP controller using labview," Sensors Applications Symposium, pp. 137-141, 2009.
13. Gumudavelli, S., Gurkan, D. and Wang, R., "Emulated network of IEEE 1451 application with multiple smart sensor reports," Sensors Applications Symposium, pp. 304-308, 2009.
14. Lee, J. G., Kim, M. H., Park, J. H., Lee, S. and Lee, C. H., "Implementation of IEEE 1451 based dual CAN module for fault tolerance of In-vehicle networking system," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 15, No. 7, pp. 753-759, 2009.
15. Lee, J. Y., Kim, D. K. and Sin, S. W., "Trend of telemetrics industry and activated method," National IT Industry Promotion Agency Weekly Technology Trend, pp. 1-11, 2009.
16. Song, E. Y. and Lee, K. B., "Understanding IEEE 1451-Networked smart transducer interface standard - What is a smart transducer?" Instrumentation &

Measurement Magazine, Vol. 11, No. 2, pp. 11-17, 2008.

17. Wobschall, D., Stepanenko, A., Maykiv, I., Kochan, R., Sachenko, A. and Kochan, V., "A multi-port serial NCAP using the IEEE 1451 smart transducer standard," Sensors Applications Symposium, pp. 293-297, 2009.
18. Texas Instruments, "CC2431 data sheet Rev. 2.01, SWRS034B," 2007.
19. IntelliGrid Architecture Environments, http://intelligriad.info