

논문 2012-07-40

인공 구조물 모니터링을 위한 무선 센서 네트워크

(A Wireless Sensor Network for Artificial Structure Monitoring)

문 정 호, 정 의 민, 박 래 정, 정 태 윤*

(Jung-Ho Moon, Ui-Min Jung, Lae-Jeong Park, Tae-Yun Chung)

Abstract : This paper presents a wireless sensor network protocol aimed for artificial structure monitoring. The proposed protocol enables the sensor network to operate at a low duty cycle for reducing power consumption with a high degree of synchronization accuracy. It also enables event-triggered measurement of environmental information with a high sampling rate and the transmission of the measured data with a low latency. The feasibility of the proposed protocol is demonstrated through experiments involving three sensor nodes and a sink node. Though a tunnel health monitoring was considered in the paper, the proposed protocol can be easily adopted in other areas.

Keywords : Wireless sensor network, Artificial structure monitoring, Time synchronization

1. 서 론

토목기술의 발전과 함께 교량이나 터널과 같은 대형 인공구조물의 수가 급격하게 증가하고 있고 구조물의 규모 또한 커지고 있는데 이러한 인공구조물들의 안전 점검과 관리는 사회적으로 중요한 문제가 되었다. 인공구조물을 시공한 후의 안전 진단과 보수, 보강 등의 적절한 유지 관리는 인공구조물의 수명을 연장하고 사용자들의 안전을 보장하는데 있어 필수적인 부분이다.

최근에는 구조물 시공한 후 이를 원격으로 모니터링하기 위하여 시공할 때부터 다양한 센서를 구조물에 설치하도록 설계하는 예가 있지만 이미 만들어진 구조물들에는 이런 원격 모니터링 시스템이 갖추어져 있지 않다. 기존의 구조물 안전 점검 방법은 전문가가 직접 구조물이 있는 곳을 방문하여 상태를 점검하거나 데이터 로거를 현장으로 가져가

데이터를 수집하는 것인데 비용 측면에서 비효율적일 수밖에 없어 자주 실시하기 어렵다.

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)는 다수의 센서 노드로 다양한 환경정보를 수집하고 그 정보를 노드들 간의 무선 통신을 통해 전송할 수 있도록 만들어진 무선 네트워크이다. 센서 네트워크는 배터리로 동작하기 때문에 소비 전력이 매우 낮으며 선이 필요하지 않아 간편하게 설치할 수 있다는 장점이 있어 기존의 인공구조물에도 쉽게 설치할 수 있고 유지비용이 높지 않아서 효과적이다. 인공구조물의 안정성 모니터링은 일반적으로 시간의 경과에 따른 인공구조물의 피로도를 측정하기 위한 것으로 데이터 측정 주기가 비교적 길고 전송할 데이터의 크기도 작아서 센서 네트워크를 적용하기 좋은 대상이라 할 수 있다.

무선 센서 네트워크를 구성할 때 가장 중요한 부분은 센서 노드들이 서로 방해하지 않으면서 효율적으로 통신할 수 있도록 만드는 것이다. 따라서 데이터 충돌을 방지하고 센서 노드들의 통신을 가능하게 하기 위한 MAC (Medium Access Control)이 필수적으로 요구되는데 무선 통신용 MAC은 크게 경쟁 기반 방식과 시분할 방식으로 나뉜다.

전통적으로 자주 사용되는 경쟁 기반 방식은 동작(대기 및 전송)과 휴면을 주기적으로 반복하는 방법인데, S-MAC[1], S-MAC에서의 고정된 대기 구간에 융통성을 부여한 T-MAC[2], 별도의 동기화 없

* Corresponding Author (tychung@gwnu.ac.kr)

Received: 10 Aug. 2012, Revised: 17 Sep. 2012,

Accepted: 04 Oct. 2012.

J.H. Moon, L.J. Park, T.Y. Chung: Gangneung-wonju National Univ.

U.M. Jeong: Gangwon EMbedded Software Cooperative Research Center

※ 본 논문의 연구는 2012년도 강릉원주대학교 교수연구년 연구지원에 의해 수행되었음.

이 CSMA (Carrier Sense Multiple Access)에 충실한 B-MAC[3] 등이 알려져 있다. 이 방식들은 구현이 간단하고 MAC 계층으로서의 역할에 충실하므로 보다 유연하고 잘 정의된 네트워크 계층을 구성할 수 있는 장점이 있으나, 데이터 전송 지연 시간에 대한 한계를 계산할 수 없고, 많은 노드들이 밀집된 지역에서는 충돌 회피를 위한 양보 시간(back-off time)으로 인해 전력 소비가 크다는 단점이 있다.

시분할 방식에서 각 노드는 자신에게 할당된 시간 슬롯에서만 동작해야 하므로 노드들 간의 엄격한 시간 동기화가 반드시 필요하다. 이를 위한 방법으로 TinyOS[4]에서 검증된 TPSN[5], FTSP[6] 등의 프로토콜이 알려져 있다. 시분할 방식에서 노드들은 물리적으로 매우 긴밀한 클러스터를 형성해야 하므로 클러스터 간의 간섭 통제나, 클러스터 내의 노드 추가 또는 제거 관리에 대한 부담이 많아 한 클러스터에 포함되는 노드들의 수에 상당한 제한이 있는 것이 일반적이다. 그러나 일단 네트워크 구성이 완료되면 데이터 충돌이 없고 긴급한 데이터 전송에 걸리는 시간을 미리 계산할 수 있으며, 전력 소비를 최소화할 수 있다는 장점을 가진다.

이 논문에서는 인공 구조물의 모니터링을 위한 시분할 방식의 MAC에 기반한 센서 네트워크 프로토콜을 제안하고 이를 실험으로 구현한다. 이 논문에서 제안하는 센서 네트워크 프로토콜은 여러 다양한 인공 구조물에 적용 가능하지만 특히 터널의 안정성 모니터링을 주요 적용 대상으로 설명을 진행한다. 기존의 센서 네트워크 기술과 비교할 때 이 논문에서 제안한 센서 네트워크는 다음의 뚜렷한 특징을 가지고 있다.

- 주기적인 환경 변수의 측정뿐만 아니라 특정 이벤트의 발생 시 평소보다 훨씬 빠른 샘플링이 가능하다.
- 이벤트 발생 후 수집된 고속 샘플링 데이터를 확정된 시간 지연 이내에 싱크 노드로 전송할 수 있다.
- 각 센서 노드로부터 수집된 측정 데이터는 정확한 시간 정보를 포함한다.

II. 시스템 설명

그림 1은 터널의 안전성 모니터링을 위한 무선 센서 네트워크에 포함되는 센서의 종류와 위치를 예시한 것이다. 변위 (각, 길이), 진동, 변형 센서 등 다양한 종류의 센서가 터널의 단면에 설치되어 테

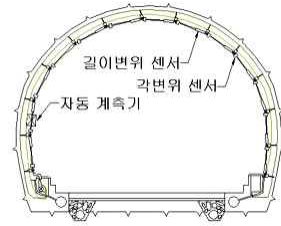


그림 1. 터널 전단면 무선 센서 네트워크 설치도
Fig. 1 The deployment of the sensor nodes in a tunnel

터널을 수집한다. 이 시스템은 게이트웨이와 싱크 노드 및 3~5개의 센서 노드들로 구성되는데 센서 노드는 다양한 물리량을 측정하여 무선으로 싱크 노드에게 측정 데이터를 전송한다. 싱크 노드는 비동기 직렬 통신을 통해 수신한 환경 데이터를 게이트웨이로 전송하며 게이트웨이는 상용 무선 통신망(CDMA, HSDPA 등)을 이용하여 서버로 데이터를 전송한다. 서버는 무선 센서 네트워크의 동작주기, 데이터 수집주기, RF 주파수 등 각종 명령어를 전송하여 무선 센서 네트워크를 관리한다.

터널 안정성 모니터링 시스템은 미리 정해진 주기마다 한 번씩 센서 노드가 구조물의 상태를 측정하고 이를 전송하는 방식으로 동작하지만 특정 이벤트가 발생했을 때에 주기적인 측정 때보다 훨씬 더 빠른 속도로 측정을 진행할 필요가 있을 수 있다. 예를 들어 지진이 구조물에 미치는 영향을 분석하려면 지진을 감지한 직후 수십 초 동안 200 Hz 이상의 높은 주파수로 구조물의 상태 데이터를 수집해야 한다. 그리고 각 센서 노드들에 의해 측정된 데이터에는 측정 시간 정보가 포함되어 있어야만 이후에 정확한 분석이 가능하다.

이를 지원하기 위한 센서 네트워크 프로토콜은 다음과 같은 기능을 필요로 한다.

- 보통의 상황에서 각 센서 노드는 정해진 주기마다 한 번씩 구조물의 상태 데이터를 측정하여 전송한다.
- 전력 소비를 줄이기 위하여 데이터를 전송한 후 다음 측정 때까지 각 센서 노드는 휴면 (sleep) 상태로 진입한다.
- 특정 이벤트의 발생을 감지하면 센서 노드들은 휴면 상태에서 빠져나와 구조물에 대한 측정을 진행한다. 이 경우의 측정 주파수는 보통의 상황

에 비해 훨씬 높을 수 있다.

- 이벤트 발생 후 수집된 데이터를 가능한 빠른 속도로 싱크 노드로 전송한다.
- 각 센서 노드로부터 수집된 측정 데이터는 정확한 시간 정보를 포함하고 있어야 한다.

기존의 센서 네트워크 프로토콜로는 이러한 조건들을 모두 만족시키기 어렵다. 이벤트 발생 시의 측정 데이터는 주기적으로 측정한 데이터보다 훨씬 대용량이므로 이를 보통의 상황에서처럼 전송한다면 전송 완료까지 매우 긴 시간이 걸린다. 그리고 측정 데이터에는 시간 정보가 포함되어 있어야 하는데 정확한 시간 정보를 유지하기 위해서는 센서 노드들이 정확한 시간 동기화를 유지해야 한다. 센서 노드는 주기적으로 휴면 상태로 진입하는데 휴면 상태에서는 정확한 시간 정보를 유지하는 것이 쉬운 일은 아니다.

III. 무선 센서 네트워크 프로토콜 설계

1. 무선 센서 네트워크 구조

무선 센서 네트워크는 그림 1처럼 터널의 전단면에 설치되므로 모든 센서 노드들과 싱크 노드는 RF 통신 범위 내에 위치한다. 따라서 센서 노드들과 싱크 노드는 단일 hop으로 통신이 가능하므로 싱크 노드를 중심으로 한 성형 (star) 구성이 가능하다. 네트워크 프로토콜로는 TDMA 기반의 UPUS (Ultra low Power USN for Star topology)를 채택하였다[7]. UPUS는 블루투스 프로토콜[8]을 무선 센서 네트워크에 적합하도록 변형한 것으로 각 노드는 활성 구간 (active duration)과 비활성 구간 (inactive duration)을 가지고 있고 비활성 구간에서 각 노드는 휴면 상태로 진입한다.

그림 2는 UPUS 프로토콜 하에서 싱크 노드를 중심으로 3개의 센서 노드들이 연결된 상황을 보여 준다. 그림 2의 연결 상황에서 통신 절차는 다음과 같다.

- 활성 구간은 참여 노드 수+4 개 이상의 시간 슬롯으로 구성된다.
- 싱크 노드가 보내는 방송 메시지에는 참여 노드들에게 할당된 시간 슬롯 정보, 참여 노드들로부터 수신한 요청에 대한 응답 정보, 네트워크의 동작 주기, 통신 참여 허용 여부 등을 표시하는 네트워크 정보, 고속 샘플링 데이터의 수집을 지시하는 명령 등이 포함된다.

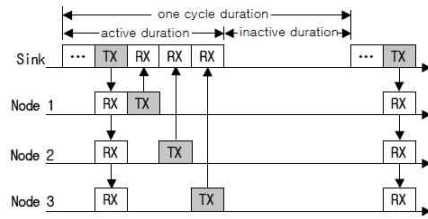


그림 2. UPUS 개념도

Fig. 2 The Concept of UPUS protocol

- 참여 노드들은 싱크 노드로부터 개별적인 명령이나 응답을 받지 않고, 한 번에 방송된 메시지로부터 자신에게 전달되는 정보를 찾는다.
- 참여 노드들은 자신에게 할당된 시간 슬롯에서 싱크 노드에게 각종 데이터와 요청을 전송한다.
- 싱크 노드로부터 고속 샘플링 데이터 전송을 허락 받은 노드가 존재하는 경우, 싱크 노드와 해당 참여 노드는 휴면 구간에 깨어나 고속 샘플링 데이터를 송수신한다.

2. 무선 센서 네트워크 시간동기화

TDMA 기반의 무선 센서 네트워크에서 시간 동기화는 가장 중요한 기술 중 하나이다. 모든 통신 노드들이 배터리로 동작하기 때문에 불필요한 전력 소비를 막기 위해 각 통신 노드는 대부분의 시간을 휴면 상태로 보내며 자신의 시간 슬롯에서 스스로 깨어나 필요한 작업을 수행하고 다시 휴면 상태로 진입한다. 이를 위해서는 각 통신 노드가 언제 휴면 상태에서 깨어나 데이터를 전송하고 수신해야 하는지 판단할 수 있어야 하는데 이 기술이 시간 동기화이다.

센서 네트워크를 구성할 때 싱크 노드는 게이트웨이 또는 서버로부터 시간 정보를 수신하여 이를 네트워크 고유의 시간 정보로 관리하고 있으며, 매 주기마다 자신의 시간 정보를 전송한다. 각 센서 노드는 싱크 노드로부터 수신한 네트워크 시간 정보를 내부적으로 유지한다.

무선 센서 네트워크에서의 데이터 전달 과정은 그림 3과 같이 여러 계층으로 나뉘어져 있다. 데이터를 송수신할 때 각각의 계층을 지나면서 필연적으로 시간 지연이 발생한다. 그러므로 정확한 시간 동기화를 위해서는 각 계층에 의한 시간 지연의 영향을 받지 않는 RF 송신과 수신 단에서 시간 정보

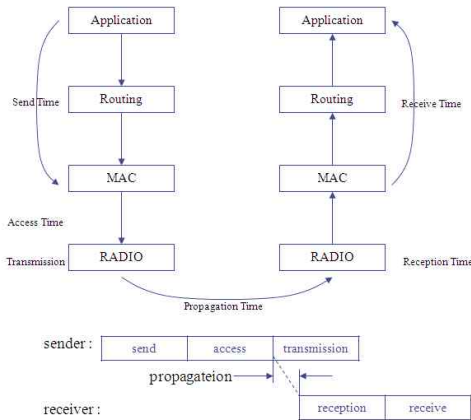


그림 3. 지연시간 발생 및 시간동기화 시점
Fig. 3 Time delay in data transmission/reception and synchronization

를 맞추어야 한다.

송신 노드는 데이터 프레임 전송 시작을 알리는 인터럽트가 발생하는 순간 자신의 시간 정보를 저장한다. 마찬가지로 수신 노드도 프레임 수신 시작을 알리는 인터럽트가 발생하는 순간 자신의 시간 정보를 저장한다. 데이터 전송과 수신 과정에서 각각의 어플리케이션 계층까지 도달하면 그 동안의 시간 경과를 확인하고 이를 미리 저장해둔 값과 더하여 네트워크 시간을 계산한다. 이렇게 계산한 시간 정보를 바탕으로 각 노드는 자신의 다음 시간 슬롯이 언제인지 파악할 수 있다.

특정 이벤트가 발생했을 때 해당 센서 노드는 휴면 상태에서 깨어난 후 고속으로 데이터를 측정해 싱크 노드로 전송하는데 이 데이터에 측정 시간을 덧붙여야 한다. 이 때 시간 정보의 분해능 문제가 있을 수 있다. 전력 절감을 위해 노드가 휴면 상태로 진입하면 MCU의 주 오실레이터는 발진을 멈추고 RTC (real time clock)를 위한 32.768 KHz의 저주파수 오실레이터가 사용되는데 오실레이터의 주파수가 낮아 이를 이용해 계산한 시간의 분해능이 보통의 상황에 비해 지나치게 낮아지게 되어 시간의 불확실성이 커지게 되는 문제가 있다.

이를 해결하기 위하여 이 논문에서 제안한 프로토콜에서는 이벤트가 발생한 즉시 주 오실레이터를 동작시켜 RTC에 의한 낮은 분해능을 보정하는 방법을 사용한다. 다음 그림 4는 시간 정보를 조정하는 간단한 예를 보여주고 있다.

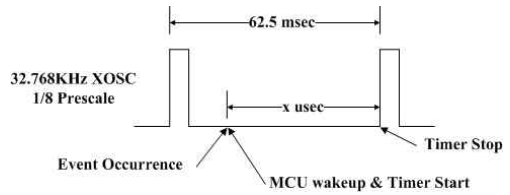


그림 4. 시간정보 보정 방법
Fig. 4 Time information adjustment method

RTC 오실레이터에 의해 65.2 ms 간격으로 타 임어 인터럽트가 발생한다면 MCU가 구분할 수 있는 최소 시간 간격이 65.2 ms이므로 분해능이 너무 낮다. 이벤트가 발생하는 순간 주 오실레이터를 동작시키고 다음 인터럽트가 발생한 시점까지의 경과 시간을 측정한다. 이 시간을 x라고 하면 이벤트가 발생한 시점은 이전 타이머 인터럽트가 발생한 시간으로부터 62.5 ms - x가 경과한 시간이라는 것을 알 수 있으므로 이 정보를 사용하면 정확한 데이터 측정 시점을 알 수 있으므로 낮은 분해능 문제를 해결할 수 있다.

3. 대용량 데이터 전송

안정성 모니터링을 위한 센서 네트워크에서 주기적으로 측정하는 데이터는 수 분에서 수 시간 간격으로 수집되므로 각 노드가 전송할 데이터의 양이 많지 않고 따라서 각 노드에게 할당된 시간 슬롯 구간에 충분히 전송 가능하다. 하지만 특정 이벤트가 발생한 후에 이루어지는 측정은 수 ms 주기로 진행될 수 있으므로 측정 시간에 길어짐에 따라 데이터 크기가 매우 커질 수 있다.

지진에 의한 영향을 분석하기 위한 용도라면 적어도 200 Hz 이상의 샘플링 주파수를 필요로 한다. 예를 들어 500 Hz의 주파수로 20초간 측정을 진행한다면 10,000 개의 측정 데이터가 발생하는데 앞에서 설명한 주기적 전송 방법으로 이렇게 큰 데이터를 전송하려면 상당히 긴 시간이 필요하다. 따라서 대용량 데이터 신속하게 전송하기 위한 프로토콜이 추가로 필요하다.

이 논문에서 제안하는 프로토콜은 대용량 데이터를 최대한 빨리 전송하기 위하여 센서 네트워크의 비활성 구간에서 전송을 진행한다. 이를 위해서 대용량 데이터의 전송을 원하는 노드와 이를 수신할 싱크 노드가 비활성 구간에서 동시에 휴면 상태

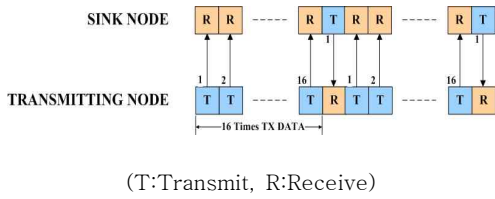


그림 5. 송신 노드와 싱크 노드의 시간 슬롯
Fig. 5 Time slots for a transmitting and a sink nodes

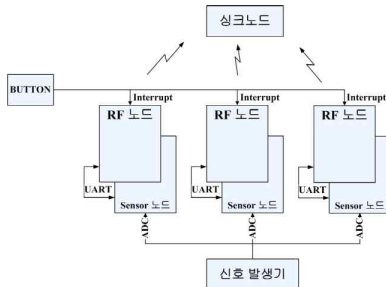


그림 6. 구현된 무선센서 네트워크 구성도
Fig. 6 The block diagram of the implemented wireless sensor network

에서 깨어나서 송수신을 진행하기 위한 추가 동기화 과정이 필요하다. 대용량 데이터 전송 프로토콜은 연결 시도, 데이터 전송, 연결 해제의 3단계로 구성된다.

동기화 데이터에 대한 전송 요청과 수락은 UPUS의 활성 구간에서 진행된다. 하나의 노드가 자신의 전송 슬롯 동안 대용량 데이터의 전송 요청 메시지를 싱크 노드로 보내면 이를 받은 싱크 노드는 다음 자신의 전송 슬롯에서 이의 수락 여부를 알리는 방송 메시지를 보낸다. 이런 과정을 거쳐 대용량 데이터의 전송이 결정되면 네트워크가 비활성 구간에 진입한 직후 대용량 데이터를 전송할 노드와 싱크 노드가 동시에 깨어나 데이터의 전송과 수신을 시작한다.

그림 5는 대용량 데이터 전송 때 데이터 송수신 슬롯의 기본 형태를 설명한다.

비활성 구간에서 깨어난 직후 송신 노드는 16 슬롯동안 연속으로 데이터를 전송하고 싱크 노드는 이를 수신한 후 그 다음 슬롯에서 16 데이터 패킷의 수신 여부를 알리는 응답 패킷을 보낸다. 이 과정에서 데이터 전송의 신뢰성을 높이기 위해 IEEE 802.16에서 정의된 Cumulative ARQ (Automatic Repeat reQuest)를 사용한다. 대용량 데이터 전송에 참여한

표 1. 센서 노드 사양

Table 1. Specifications of a sensor node

항목		사양 (모델)
MCU	모 델	ATmega2560 (7.3728MHz)
	타 입	8-bit Microcontroller
	메 모 리	256KB(boot :4KB)
	내부 RAM	8KB
	외부 RAM	256KB
	소비전력	Active Mode : 8mA Sleep Mode : 15uA
RF	프로세서	CC2420 (2.4GHz)
	안 테 나	1/2λ dipole
	출 력	0dBm
전 원		리튬 AA 배터리 1개 (3.6V)

표 2. 구현된 프로토콜 관련 시간 설정 정보

Table 2. Time information relevant to the implemented network protocol

설정항목		설 정 값	
동작주기		3,000 msec	
활 성 구 간	전송구간	싱크 노드	8 msec
		센서 노드	8 msec
	수신구간	싱크 노드	24 msec
		센서 노드	8 msec
대기구간	싱크 노드	4 msec	
	센서 노드	20 msec	
비활성 구간		2,964 msec	

두 노드는 이 과정을 대용량 데이터의 전송을 완료할 때까지 반복한다.

데이터 전송이 끝나면 송신 노드는 이를 알리는 패킷을 싱크 노드에게 전송하고 싱크 노드가 이를 수신하고 이에 대한 응답을 보내면 두 노드의 연결이 해제된다. 연결이 비정상적으로 종료되면 최초의 연결 시도 단계부터 다시 시작한다.

IV. 무선 센서 네트워크 프로토콜 구현

1. 구현을 위한 시스템 구성

이 논문에서 제안한 네트워크 프로토콜을 검증하고 성능을 평가하기 위한 시스템을 그림 6과 같이 구성하였다.

그림 6의 센서 네트워크는 1 개의 싱크 노드와 3개의 센서 노드로 구성되어 있다. 싱크 노드는 컴

퓨터와 비동기 직렬 통신 포트로 연결되어 있고 센서 노드와는 2.4GHz 대역의 무선 통신으로 연결된다. 각 센서 노드는 RF 모듈과 센싱 모듈 두 부분으로 구성된다.

터널 안전성 모니터링을 위한 실제 무선 센서 네트워크는 지진과 같은 이벤트를 감지하여 각종 데이터를 측정하지만 본 논문의 구성에서는 각각의 센서 노드에 연결된 스위치를 이용하여 이벤트를 동시에 발생하도록 구성하였다. 또한 이벤트 발생 후 센서 노드에 의해 수집된 데이터의 정확성을 판단하기 위해 신호발생기를 이용하여 외부에서 입력을 센서 노드로 공급하였다.

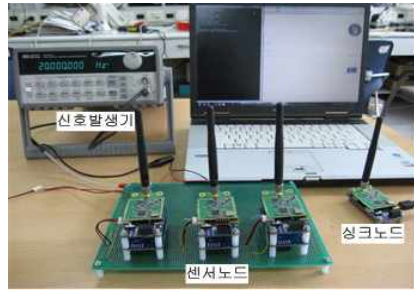


그림 7. 실험 환경

Fig. 7 The experimental setup

2. 센서 노드

표 1은 실험에 사용된 센서 노드의 사양을 나타낸 것이다. MCU로는 Atmel의 ATmega2560을 사용하였고, RF 송수신 모듈로 TI의 CC2420을 장착하여 ISM 밴드의 주파수 대역 중 2.4GHz를 이용하여 데이터 전송 속도를 최대한으로 높였다.

표 2는 실제 구현한 네트워크 프로토콜의 전체 동작 주기와 활성/비활성 구간에 관련된 시간 정보를 보여준다. 싱크 노드와 센서 노드들은 모두 3,000 ms 중 36 ms만 동작하고 나머지 시간 동안 휴면 상태에 있기 때문에 듀티 사이클이 1.2 %에 지나지 않는다.

3. 실험 환경

그림 7은 그림 6의 블록선도에 해당하는 실제 실험 환경의 사진이다.

4. 시간 동기 정확성 평가

첫 번째 실험으로 시간 동기의 정확성을 평가하기 위하여 하나의 센서 노드의 전송 슬롯이 시작되는 시점과 싱크 노드의 수신 슬롯이 시작되는 시점을 비교하였다. 시간 동기 오차가 없는 이상적인 센서 네트워크라면 두 슬롯의 시작이 정확하게 일치해야 한다. 다음 그림 8은 오실로스코프로 확인한 결과이다.

붉은 선은 센서 노드가 데이터를 송신하는 구간을 나타내고 노란 선은 싱크 노드가 데이터를 수신한 구간을 표시한다. 위 파형에서 시간 축 한 칸은 2 μ s에 해당하므로 송신과 수신 사이의 시간 오차가 $\pm 2 \mu$ s의 범위에 있음을 확인할 수 있다. 이 정도의 오차는 기존 무선 센서 네트워크에서 사용하



그림 8. 싱크 노드와 센서 노드 사이의 동기화 오차

Fig. 8 An experimental result for evaluating the synchronization error

고 있는 시간 동기화 프로토콜인 TPSN 및 FTSP의 평균 오차인 수 μ s와 비교할 때 뒤떨어지지 않는다. TPSN이나 FTSP에서 MCU가 휴면 상태로 진입하지 않는다는 것을 고려하면 충분히 수용 가능한 범위의 동기화 오차라고 판단된다.

5. 이벤트에 의한 측정 데이터 평가

3개의 센서 노드들의 ADC에 정현파 입력을 연결한 상태에서 이벤트를 발생시켜 센서 노드들이 이 입력 신호를 측정하도록 하였다. 정현파의 주파수는 20 Hz이며 각 센서 노드는 초당 500 회의 속도로 20초간 10,000 개의 샘플을 측정하였다. 20 Hz의 주파수를 사용한 이유는 지진파의 대부분의 주파수 성분이 20 Hz 이하이기 때문이다. 20초 후 측정을 완료하면 각각의 센서 노드는 앞에서 설명한 대용량 데이터 전송 프로토콜에 따라 각 10,000 개의 데이터를 싱크 노드로 전송한다.

그림 9의 위 그림은 싱크 노드가 수신한 데이터

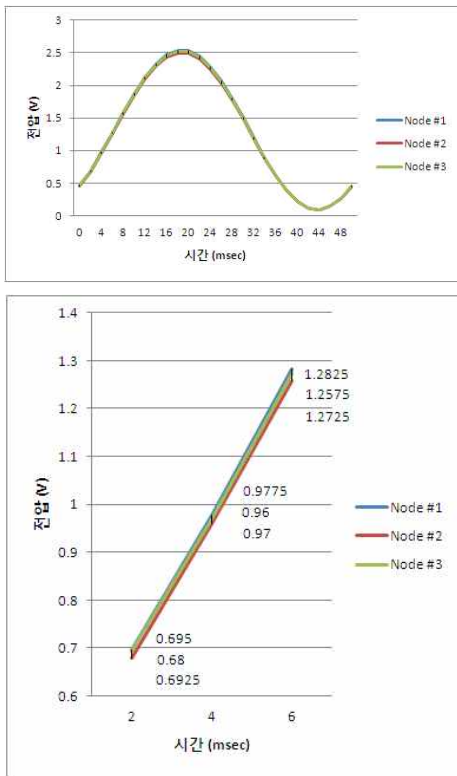


그림 9. 센서 노드들로부터 수신한 데이터 비교
 Fig. 9 The measurement data received from 3 sensor nodes

중 정현파의 한 주기에 해당하는 25 샘플의 값을 그래프로 표시한 것이며 아래 그림은 파형의 일부를 확대한 것이다.

세 신호의 파형으로 보면 시간 오차는 0.1 ms 미만으로 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 20 Hz 신호의 주기가 50 ms이므로 각 센서 노드가 측정 데이터에 첨부한 시간 오차는 신호 주기의 0.2% 미만이다. 따라서 20 Hz 정도의 신호를 측정하는데 있어서 동기화 오차는 거의 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 이는 이 논문에서 제안한 프로토콜이 수십 Hz 정도의 입력이 구조물에 미치는 영향을 분석하는데 충분한 정도의 시간 정확성을 제공할 수 있다는 것을 뜻한다.

V. 결 론

이 논문에서는 터널의 안전성 모니터링에 적용하기 위한 무선 센서 네트워크 프로토콜을 제안하고 실험을 통해 그 타당성을 보였다. 전력 소비를 줄이기 위해 센서 노드들은 주기적으로 휴면 상태로 진입하면서도 센서 노드들 간의 시간 동기화 오차를 $\pm 2 \mu s$ 이내로 유지할 수 있음을 보였다. 또한 특정 이벤트가 발생했을 때 고속으로 데이터를 수집하여 신속하게 전송할 수 있는 대용량 데이터 전송 기술을 제안하였다. 이 논문에서는 터널의 안전성 모니터링을 중심으로 설명하고 있지만 논문에서 제안한 센서 네트워크 프로토콜은 터널뿐만 아니라 교량이나 빌딩 등의 다양한 인공구조물의 모니터링에도 쉽게 적용가능하다.

참 고 문 헌

- [1] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin. "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," Proceedings on INFOCOM 2002, Vol. 3, pp. 1567-1576, 2002.
- [2] T. Dam, K. Langendoen. "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," Proceedings on the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, pp.171-180, 2003.
- [3] J. Polastre, J. Hill, D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," Proceedings on the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pp.95-107, 2004.
- [4] P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer, D. Culler, "TinyOS: An operating system for wireless sensor networks," Ambient Intelligence, Springer - Verlag, 2004.
- [5] S. Ganeriwal, R. Kumar, M.B. Srivastava, "Timing-Sync Protocol for Sensor Networks," Proceedings on The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys), pp.138 - 149, 2003.
- [6] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization

Protocol,” Proceedings on the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp.39-49, 2004.

[7] H.B.Lee, U.M.Jung, L.J.Park, J.H.Moon, T.Y.Chung, “Monitoring System of Blind Areas in a Skiing Resort using a USN”, Journal of KIPS, Vol.16-D, No.2, pp.249-256, 2009 (in Korean).

[8] Specification of Bluetooth System: Core(2001), <http://www.bluetooth.org>

저 자 소 개

문 정 호



1991년 서울대학교 제어계측 공학과 학사.

1993년 한국과학기술원 전기 및전자공학과 석사.

1998년 한국과학기술원 전기 및전자공학과 박사.

1998년~2002년 삼성전자 및 휴맥스 연구소 책임연구원

2003년~현재 강릉원주대학교 전자공학과 교수.

관심분야: 임베디드 시스템, 센서 네트워크.

Email: itsmoon@gwnu.ac.kr

정 의 민



2000년 강릉대학교 컴퓨터과 학과 학사.

2005년~현재 강원 임베디드 소프트웨어 연구센터 선임연구원.

2007년~현재 강릉원주대학교 전자공학과 석사과정.

관심분야: 임베디드 시스템, 센서 네트워크

Email: deanbong@gwnu.ac.kr

박 래 정



1991년 서울대학교 전기공학과 학사.

1993년 한국과학기술원 전기 및전자공학과 석사.

1997년 한국과학기술원 전기 및전자공학과 박사.

1997년~2000년 LG 종합기

술원 선임연구원

2001년~현재 강릉원주대학교 전자공학과 교수.

관심분야: 기계학습, 최적화, 임베디드 시스템, 센서 네트워크

Email: ljpark@gwnu.ac.kr

정 태 운



1987년 연세대학교 전기공학과 학사.

1989년 연세대학교 전기공학과 석사.

2000년 연세대학교 전기컴퓨터공학과 박사.

1989년~1996년 삼성 종합

기술원 선임연구원.

1996년~2001년 삼성전자 중앙연구소 책임연구원.

2002년~현재 강릉원주대학교 전자공학과 교수, 강원 임베디드소프트웨어 연구센터 센터장

관심분야: 영상부호화, 임베디드 시스템, 센서 네트워크

Email: tychung@gwnu.ac.kr