논문 2007-44CI-5-5

USN 기반 실시간 주행 상황 정보 제공을 위한 MAC 설계 및 성능 분석

(Design and Performance Analysis of a new MAC Protocol for Providing Real-time Traffic Information using USN)

박 만 규*, 소 상 호*, 김 병 철**, 이 재 용**, 임 재 한***, 손 명 희***

(ManKyu Park, Sang Ho So, Byung Chul Kim, Jae Yong Lee, Jae Han Lim, and Myung Hee Son)

요 약

유비쿼터스 환경에서는 사람이 개입하지 않은 상태에서 주위의 데이터를 센싱하고 전송해주는 센서 네트워크 시스템의 중요성이 날로 커지게 될 것이다. 유비쿼터스 환경에서 도로에 센서를 설치하고, 이를 통해 사전 차량 감지 및 속도를 측정하여 실시간 주행 상황 정보를 제공하면 도로에서의 안전성 개선과 교차로에서의 효율적인 트래픽 제어 효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 USN 기반의 실시간 주행 상황 정보 제공을 위해 센서 노드와 AP간의 신뢰성 있고 실 시간성을 보장하는 MAC을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 MAC은 IEEE 802.15.4를 기반으로 한 채널 구조에 TDMA 슬롯을 각 센서 별로 할당하고, AP와 센서의 거리가 먼 경우를 위해 Relay를 통한 통신 방법을 도입하였으며, 무선 채널 오류 발생 시 이를 재전송 할 수 있는 프레임 구조를 제안하였다. 또한, Beacon을 이용하여 AP와의 동기화를 수행하는데 있어서, 다양한 교통 트래픽에 따라 가장 효율적으로 전력을 소모할 수 있도록 센서의 Sleep mode를 제어하는 hybrid tracking mode를 제안하였다. 제안된 MAC 프로토콜을 sim++[1]를 이용하여 시뮬레이터를 구현하였으며, 다양한 시스템 파라미터 하에서 성능 분석을 수행하였다. 이를 통해 제안된 방안이 전력소모를 줄이며, 신뢰성을 요구하는 실시간 응용 시스템에서 우수한 성능을 나타냄을 보였다.

Abstract

In ubiquitous environment, sensor networks that sense and transmit surrounding data without human intervention will become more important. If sensors are installed for detecting vehicles and measuring their speed in the road and that real-time information is given to drivers, it will be very effective for enhancing safety and controlling traffic in the road. In this paper, we proposed a new reliable and real-time sensor MAC protocol between AP and sensor nodes in order to provide real-time traffic flow information based on ubiquitous sensor networks. The proposed MAC allocates one TDMA slot for each sensor node on the IEEE 802.15.4 based channel structure, introduces relayed communication for distant sensors, and adopts a frame structure that supports retransmission for the case of errors. In addition, the proposed MAC synchronizes with AP by using beacon and adopts a hybrid tracking mode that supports economic power consumption according to various traffic situations, We implemented a simulator for the proposed MAC by using sim++[1] and evaluated various performances. The simulation results show that the proposed MAC reduces the power consumption and reveals excellent performance in real-time application systems.

Keywords: Real-time, MAC, TDMA, USN, sim++

I. 서 론

유비쿼터스 컴퓨팅은 물리적인 공간과 컴퓨팅 기반의 가상공간을 융합한 새로운 개념을 가지고, 모든 사물들의 인터넷화를 지향하게 된다. 따라서 사용자에게 인식되지 않는 다수의 컴퓨터가 실세계에 존재하고 이

* 학생회원, ** 평생회원, 충남대학교 정보통신공학과
(Department of Information and Communications Engineering, ChungNam National University)
*** 정회원, 한국전자통신연구원
(Telematics · USN Research Division, ETRI)
접수일자: 2007년5월29일, 수정완료일: 2007년9월4일

것들이 상호 작용을 하여 사용자에게 유용한 일들을 수행하게 된다. 이 때, 이를 위한 기기들 간의 연결은 망 구성이 복잡하며 자유로운 접속이 어려운 유선 네트워크 토폴로지보다는 무선 네트워크 환경을 잘 활용해야만 네트워크 구성이 유연하게 이루어질 수 있다. 이런 환경에서 주위의 데이터를 사람이 개입하지 않은 상태에서 센싱하고 전송해주는 센서 네트워크 시스템의 중요성은 점점 더 커지게 될 것이다.[2]

센서 네트워크를 교통 및 운송 산업에 적용하게 되면 사전 차량 감지 및 속도 측정 등에 활용하게 되어 도로의 안전성을 개선할 수 있고 교차로에서의 효율적인 트래픽 제어를 할 수 있다. 이를 위해 여러 나라에서는 도로 상에 센서 노드들을 설치한 후 차량의 유, 무 그리고 속도 등을 측정하여 이를 충돌 방지 등에 활용하고자 하는 연구를 최근에 활발히 진행하고 있다.[3] 이러한 연구에 있어 가장 중요한 문제는 어떻게 실시간으로 센서 노드의 이벤트를 AP에 보고하여 이 정보를 운전자에게 전달하는가이다. 기존의 센서 네트워크 MAC 연구는 망의 생존성을 높이는 소비 전력 감소 즉, 에너지 효율성 문제와 확장성 등의 문제에 초점을 맞추어 왔으나 교통 정보 시스템에서 가장 중요한 고려 사항은 실시간 정보 제공이다. 따라서 현재 센서 네트워크에 적용되는 MAC과는 다른 별도의 신뢰성 있는 실시간 MAC이 제안되어야 하고 이를 실시간 주행상황 정보와 같은 특정 환경에 적합한 것인지 검증하는 작업이 필요하다. 본 논문에서는 도로 상의 센서 노드로부터 검출한 이벤트를 AP에게 실시간으로 전달할 수 있으면서도 전력 소모는 줄일 수 있는 실시간 주행 상황 정보시스템을 위한 센서 네트워크의 MAC 구조를 제안하고 이의 성능을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 Ⅱ장에서 센서 MAC 연구 동향 및 제안 배경을 분석하고, Ⅲ장에서 제안된 MAC 프로토콜 설계에 대해서 설명한다. 이어서 Ⅳ장에서는 Sim++를 이용하여 시뮬레이터를 구현하는 과정을 살펴본 후, Ⅴ장에서 구현된 시뮬레이터를 이용하여 제안한 MAC의 성능을 평가 한다. 그리고 마지막 Ⅵ장에서 본 논문의 결론을 맺도록 한다.

Ⅱ. 센서 MAC 연구 동향 및 제안 배경

현재까지 진행된 센서 네트워크 MAC 연구들을 크게 분류하면 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 표 1과 같은 방안의 기본 연구 방향은 주로 에너지 효율을 증대하여

표 1. 센서 네트워크의 MAC 프로토콜 비교[4]
Table 1. Comparison of MAC protocols for sensor networks.

MAC 프로토콜	TDMA 기반	CSMA 기반	Hybrid TDMA/FDMA
채 널 액세스 방 안	각 노드마다 전송할 수 있는 타임 슬롯을 고정 할당	경쟁 기반의 랜덤 액세스	Centralized frequency and time division
특징	- 스케줄에 따라 지정된 타임 슬롯에만 통신 가능 - 낮은 duty cycle	- 에너지 효율성 개선을 위해 listening과 wakeup을 반복 - 백오프 방안을 통해 반복적인 충돌 문제해결 및 robustness 제공	- 에너지 최소화를 위한 하드웨어 기반의 접근 - 에너지 제약이 있는 센서 망에서 시간 제약적인 모니터링 응용에 적합

망의 생존성을 증대시키거나, 노드 수 증가에 따른 데이터 전달의 안정성에 초점을 맞추어 진행되었다. 또한 싱크 노드까지의 데이터 전송이 멀티 홉으로 이루어진 환경에서 라우팅과 MAC이 잘 조율되어 동작하는 가에 주로 초점을 맞추어 개발되었다. 그러나 실시간 주행 상황 정보 제공을 위한 환경에서는 모든 데이터를 전송받는 AP와 센서 노드는 싱글 홉으로 통신하는 구조이다. 또한, 이벤트 발생에서 전송까지의 실 시간성에 대한 요구와 신뢰성, 에너지 효율성에 대한 요구가 모두 만족되어야 한다. 그러나 기존의 MAC 연구에서는 이러한 요구 조건을 모두 만족시키는 경우가 드물다. 따라서 본 논문에서는 이러한 요구 사항에 초점을 맞춘, 신뢰성을 보장하면서 간헐적인 트래픽 발생에서도 실시간성을 제공하는 MAC을 제안한다.

Ⅲ. 실시간 센서 MAC 프로토콜 설계

USN 기반 실시간 주행 상황 정보 제공을 위한 MAC 프로토콜의 설계를 위해서, 먼저 주행 상황 정보 제공 토폴로지를 구성하였고, 그에 따른 MAC 프로토콜 프레임을 설계하였다.

1. USN 기반의 주행 상황 정보 시스템 토폴로지 구성

토폴로지의 주요 구성은 그림 1과 같이 크게 센서 노드, AP노드, 릴레이(Relay) 노드 세 부분으로 구성된다.

AP, 릴레이와 센서 노드의 구성은 그림 1과 같다. 센서 노드는 센서의 전송 범위를 고려하여 AP와 직접 통이 가능한 AP 센서 노드 군과 거리가 멀어서 AP와 직접 통신이 곤란한 경우에 상시 전원을 사용하는 릴레이를 통하여 센싱 데이터를 AP에 전달하는 릴레이 센서 노드 군으로 나누어 구성하였다. 센서 노드의 구성은

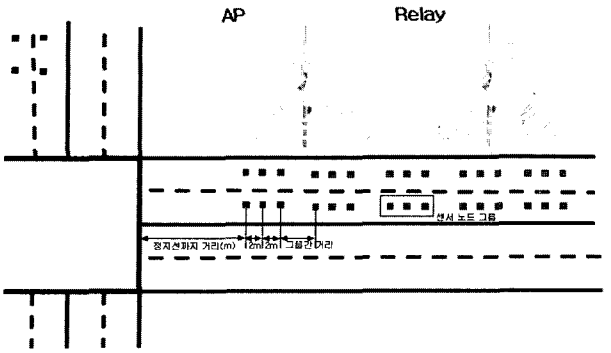

그림 1. 주행 정보 시스템 토폴로지
Fig. 1. Topology of traffic information system.

정지선과의 이격 거리, 센서 그룹간의 이격 거리, 그룹 내의 센서간의 이격 거리를 고려하여 이루어졌다. 교차로의 정지선과 정지선 가장 가까이 있는 센서 노드사이의 이격 거리는, 센싱 데이터를 전송하였을 경우 운전자가 응용 시스템이 제공하는 정보를 보고 발생할 수 있는 위험 상황에 대해서 충분히 준비 또는 예방할 수 있는 시간이 보장될 만큼의 이격 거리를 가져야 한다. 그룹간의 이격 거리는 자동차의 움직임 변화를 놓치지 않고, 센서 자원을 가장 효과적으로 사용할 수 있는 거리를 유지하도록 하였고 그룹 내 세 개의 센서간 거리는 2m로 고정하였다. 이는 센서 간의 이벤트 발생 시간을 이용하여 자동차의 속도를 측정하고, 측정된 속도를 바탕으로 속도 차이를 계산하여 가속 및 감속을 판단하게 하기 위함이다.

2. MAC 프로토콜 프레임 구성

USN 기반으로 실시간 주행 상황 정보 제공을 위해 제안하는 MAC의 슈퍼 프레임 구성은 그림 2와 같다. 슈퍼 프레임은 beacon 구간, AP와 통신하는 센서 노드들의 데이터 전송 구간, 릴레이와 통신하는 센서 노드들의 데이터 전송 구간, AP와 통신하는 센서 노드들의 데이터 재전송 구간, 릴레이와 통신하는 센서 노드들의 재전송 구간, AP와 릴레이간의 데이터 전송 구간, CAP(Contention Access Period) 구간, 비활성화(inactivation) 구간으로 구성된다. 구성된 토폴로지에서 센서 노드와 AP간의 MAC은 TDMA를 기반으로 하였으며, 정지선 가까이 있는 노드는 센싱 이벤트를 시급하게 처리하여야 하는 특성 상, 비컨을 수신하고 빨리 센싱 데이터를 AP에 보고하도록 하기위해 그림 2와 같이 슈퍼 프레임 앞 쪽의 타임 슬롯을 할당하였다. 전체적으로 기본 타임 슬롯은 2ms로 구성되며, 비컨과 각 노드들은 자신에 할당된 타임 슬롯에만 무선 채널을 이용하는 TDMA 방식을 이용하므로 데이터 전송 시 서로 충돌이 일어나지 않는다. 비컨 구간은 전체 센서 노드 네트워크의 시간 동기와 노드의 타임 슬롯 할당 정보를 제공하는 구간이다. AP 전송 구간은 AP영역에 있는 센서 노드들에 할당된 타임 슬롯으로서 센싱된 데이터를 AP로 전달하고, 이에 대한 응답(ACK)을 받는데 사용되는 구간이다. 릴레이 전송 구간은, 릴레이 영역에 있는 센서 노드들에 할당된 타임 슬롯으로서, 센싱된 데이터를 릴레이까지 전달하고, 릴레이로부터 전송에 대한 응답을 받는데 사용되는 구간이다. AP노드와 릴레이 재전송 구간은 각각 전송 실패 시 재전송을 위한 구간이고 AP-릴레이 전송 구간은 릴레이에서 모은 데이터를 AP에 전달하는 구간이다. 마지막으로 CAP구간은 센서 네트워크에 새로 추가되는 센서 노드가 타임 슬롯을 할당 받기 위해 경쟁기반으로 채널을 접근하는 구간이다. 비활성 구간에서 각 노드는 idle 또는 저 전력 이용 상태로 들어가 에너지 소비를 최소화하게 된다. 비활성화 구간이 클수록 전력 소모는 줄어들지만, 센싱한 데이터를 어플리케이션까지 전달하는 시간 지연이 늘어나게 되므로 적절한 비컨 간격을 사용하여 비활성화 구간을 조절해야 한다.

3. Hybrid tracking mode

일반적으로 비컨을 이용하여 동기를 유지하는 센서 네트워크에서 전력 소비의 가장 큰 부분을 차지하는 것

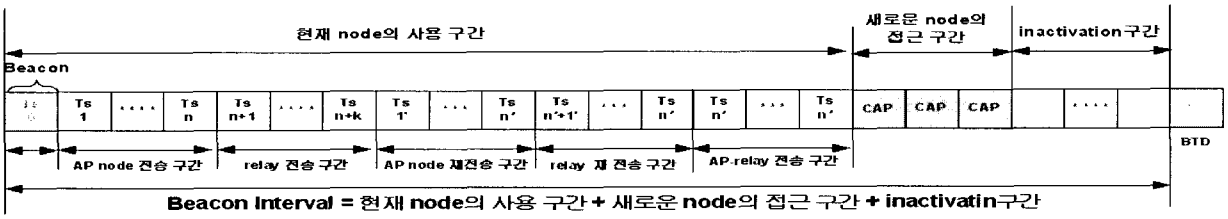

그림 2. 제안하는 센서 MAC의 슈퍼프레임 구조
Fig. 2. Superframe structure of the proposed sensor MAC.

은 비컨을 수신하며 소비하는 전력이다. 센서 네트워크에서 비컨을 이용하여 동기를 유지하는 방법으로는 비컨 tracking 모드와 non-tracking 모드 두 가지가 있다. 비컨 tracking 모드는 센서 노드에 지속적인 센싱 데이터가 발생하여 전송하여할 데이터가 많은 경우, 지속적으로 비컨을 수신하여 동기 정보를 계속 유지하며 비록 전력 소비는 늘어나지만 빨리 데이터를 전송하는 모드이며, 이와 반대로 간헐적으로 센싱 데이터가 발생하여 적은 양의 데이터를 전송해야 하는 경우 동기 정보를 유지하지 않도록 하여 에너지 효율을 높이고 센싱 이벤트가 발생하였을 때 비로소 비컨을 찾아 그 후 전송하여 전송지연 시간이 늘어나는 non-tracking 모드가 있다.[5~6]

본 논문에서는 센싱 데이터의 양이 매우 가변적이며, 시간지연에 민감한 실시간 교통 상황 정보를 처리하기위해 tracking 모드와 non-tracking 모드의 성질을 모두 갖는 그림 3과 같이 동작하는 hybrid tracking 모드를 제안한다. hybrid tracking 모드는 이벤트 발생이 많은 시간대에는 센서 노드에게 비컨을 계속 수신토록 하여, 비록 전력 소비는 많아지지만, 자신의 타임 슬롯에 바로 센싱 데이터를 전송하는 tracking 모드로 동작하게 했다. 이와 반대로, 교통량이 적어 이벤트 발생이 적은 경우에는 센서 노드에게 비컨을 수신 하지 않도록 하여 전력소비를 최소화 하고, 센싱 이벤트가 발생했을 때부터 비컨 수신을 시도하고 비컨을 수신한 후, 시간동기를 맞추고 나서 자신의 타임 슬롯에 센싱 데이터를 보고하는 non-tracking 모드로 데이터를 전송하게 하였다.

또한 데이터 전송 지연에 대해서도 hybrid tacking 모드는 tracking 모드와 non-tracking 모드의 특성을 모두 갖는다. 먼저 tracking 모드로 동작하는 경우 최대 전송 지연 시간이 발생하게 될 때는 센싱 데이터가 자신의 타임슬롯 바로 다음에 발생하는 경우이다. 이렇게 되면 해당 센서 노드는 다음 비컨 후 자신의 타임 슬롯이 돼서야 비로소 데이터를 전송 할 수 있으므로

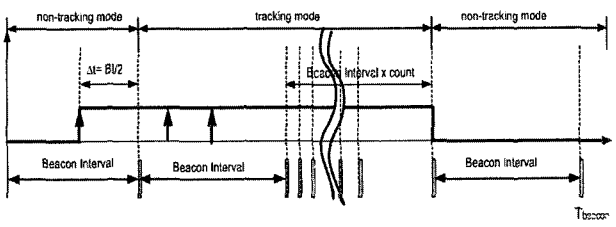

그림 3. 하이브리드 트래킹 모드 천이
Fig. 3. Hybrid-tracking mode transition.

비컨 간격 (Beacon Interval)만큼의 최대 전송 지연시간이 발생하게 된다. 다음으로 non-tracking 모드로 동작하는 경우에는 비컨 타임 슬롯 다음에 바로 센싱 데이터가 발생하는 경우인데, 이렇게 되면 센서 노드는 비컨을 수신하기 위해 비컨 간격만큼 지연 되고, 그 후 비컨을 수신한 후, 자신의 타임 슬롯에서 데이터를 전송하게 되므로 비컨 간격 + 타임 슬롯만큼의 최대 전송 지연 시간이 발생하게 된다. 이를 통해서 보듯이 비컨 간격 내에서 슈퍼프레임의 크기에 따라 조금 차이는 있겠지만, 비활성구간을 포함하는 비컨 간격을 생각하면, 최대 전송 지연시간에 가장 큰 영향을 미치는 것은 비컨 간격의 크기이다. 그러므로 이에 대해 실시간 주행 상황 정보 제공을 위한 본 논문에서는 시속 100Km까지 이동하는 차량과 센서 노드의 수명 등을 고려하여 비컨 간격을 512ms로 설정하였다. 하지만 차량의 속도가 더 빠른 경우에 대해서는 비컨 간격의 변경이 필요할 것으로 여겨진다. 이와 같이 차량의 흐름에 따라, 차량의 양이 많은 경우에는 센싱 이벤트가 많으므로 tracking 모드를 사용하고, 차량의 흐름이 적어 센싱 이벤트가 적은 경우에는 non-tracking 모드를 이용하는 hybrid tracking 모드를 이용하게 되면, 각각의 센싱 데이터의 양에 맞는 적합한 모드를 능동적으로 선택하게 되어 데이터 전송 지연과, 수신 전력 소비를 가장 효과적으로 혼합하여 실시간 주행 상황 정보를 제공에 적용할 수 있다.

4. 모드 천이

제안하는 MAC 프로토콜에서 모드 천이는 비컨 프레임의 전송 주기를 말하는 비컨 간격의 정수배를 세어 정하게 된다. 만약 센서 노드에서 일정 기간 센싱 이벤트가 발생하지 않게 되면 hybrid tracking 모드를 사용하는 MAC에서는 모드 천이가 일어나게 되는데, 이 천이 시점의 최적 구간을 비컨 tracking시 소모되는 에너지를 분석하여 계산할 수 있다. 여기서 모드 천이 카운트(transition count)는 tracking 모드에서 non-tracking 모드[7]로 전환하도록 하는 시점으로 비컨을 수신하는 개수로 정의한다. 즉 모드 천이 카운트가 10이라는 의미는 마지막 이벤트가 감지되고 난 후, 비컨 프레임 10개를 수신하는 5.12 초 (BI = 512ms일 때) 동안에 그림 3에서와 같이 tracking 구간에서 아무런 이벤트도 감지되지 않으면, non-tracking 모드로 전환하게 되는 것이다. 이때, 예상되는 최적의 모드 천이 카운트는 tracking 모드와 non-tracking 모드가 비컨을 수신

하면서 소모하는 전력량을 분석하여 추정할 수 있다. 아래 수식 (1)과 (2)에서 P_r과 P_i을 각각 비컨 수신시의 전력 소모량과 비컨을 수신하기 위한 수신 대기 시의 전력 소모량이라고 하고, T_b를 비컨 프레임 수신 시간이라고 한다면, 센서 노드에서의 비컨을 수신하는데 소요되는 전력은 tracking 모드와 non-tracking 모드에서 각각 다음과 같이 쓸 수 있다[7].

$$E_{Tracking} = P_r T_b \tag{1}$$

$$E_{Non-Tracking} = P_i \frac{BI}{2} \tag{2}$$

(2) 식에서 BI/2는 non-tracking 모드에서 이벤트 발생 후 AP와의 동기를 맞추기 위해 비컨을 수신하는데 걸리는 평균 시간이다. (1) 과 (2)식에서 센서 노드는 non-tracking유지 시간이 tracking하면서 N개의 비컨을 수신하는데 소모한 전력보다 작아야 non-tracking 모드를 통해 비컨 수신 전력 소모를 줄일 수 있으므로 식(3)과 같이 되어야 한다.

$$E_{Non-Tracking} \leq E_{Tracking} \times N \tag{3}$$

따라서

$$N \geq \frac{BI}{2T_b} \times \frac{P_i}{P_r} \tag{4}$$

만약, $P_r = P_i$와 같이 비컨 수신 대기 전력과 비컨 수신 전력이 같고, $BI = 512ms$이며, 비컨 수신 시간을 $T_b = 2ms$으로 적용하면 식(4)을 이용하여 계산된 최소 모드 천이 카운트는 128이 된다.

Ⅳ. 시뮬레이터 구현

1. 도로 및 센서 노드 모델링

도로 위에 차선이 하나만 있다고 가정하고, 차량 역시 차선을 따라 움직이고, 다른 곳으로 빠져나갈 곳이 없다고 가정하면, 그림 4와 같이 각각의 센서 노드를 하나의 큐로 모델링하고 전체 시스템을 큐잉 네트워크로 모델링하여 차량을 큐 안으로 들어가는 패킷으로 모델링 하는 것이 가능하다. 또한 차선이 하나인 경우에 차량들은 앞의 차량의 속도 변화에 반응하여 속도를 조절 할 수밖에 없으며, 앞 차량을 추월 하는 것은 불가능하므로 FIFO(First In, First Out) 큐로 모델링 할 수 있다. 도로위에 센서가 설치되어 센서노드를 FIFO 큐

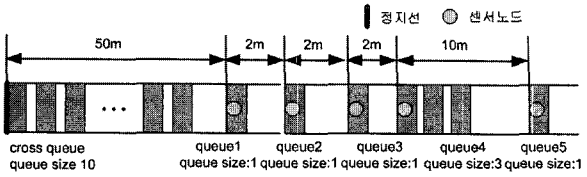

그림 4. 시스템의 큐잉 네트워크 모델링
Fig. 4. Queueing network modeling of the system.

로 모델링함에 있어서 그림 4와 같이 각 노드간의 거리에 차량이 머무는 것을 큐의 버퍼 크기로 결정하였으며, 하나의 센서 노드 큐에서 서비스된 차량의 이동 모습을 패킷이 다음 센서 노드 큐로 인입되는 큐잉 네트워크로 모델링 하였다. 또한 실제 센서는 존재 하지 않지만 정지에 대한 알람의 판단 및 운전자에게 교차로 상황을 전달하는 중요한 파라미터가 되는 정지선까지의 공간에 대해서 모델링이 필요한데 이를 위해서 가상의 큐를 이용하여 정지선으로 모델링 하였다.

2. Sim++를 이용한 트래픽 구현

본 논문에서는 제안한 센서 MAC의 성능을 검증하기 위해서 플로리다 대학에서 구현한 큐잉 네트워크 시뮬레이터인 Sim++[1]를 사용하였다. 시뮬레이터의 각 모듈 흐름은 그림 5와 같이 가장 먼저 GenTraffic()함수에서, 실측한 데이터를 이용해서 만든 시간대 별 차량 간격의 평균값 리스트를 이용하여 포아송 도착 분포를 가지는 트래픽을 시간대 별로 발생 시킨 후 MyRequest() 함수를 호출한다. MyRelease() 함수는 차량으로 표현된 패킷이 큐로 표현된 센서 노드를 빠져나갈 때 호출되는데, 여러 개의 센서 노드에 대해서 프로그램에서는 배열로 표현되어 있으므로, 정지선을 표현한 cross_q가

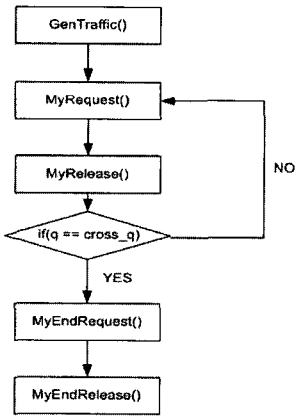

그림 5. 시뮬레이터의 기능 모듈 흐름도
Fig. 5. Flow chart of simulator function module.

될 때가지 계속 MyRequest()함수와 MyRelese()함수를 반복하는 것으로 각 센서노드를 지나는 모습을 구현하였다. 정지선을 나타낸 cross_q에 도달하면 함수는 MyEndRequest()를 호출하여 마지막 큐에 넣어주고, MyEndRelease()를 예약한다.

도로를 큐잉 네트워크로 모델링하였을 때, 차량이 막혀 앞으로 진행하지 못하는 도로 교통 상황을 모델링하여야 하는데, 이에 대해서는 Sim++에서 제공하는 preempt() 함수를 이용하였다. preempt() 함수는 해당 토큰과 우선순위 등급을 가지고 서비스를 요청하는데, 여기서 우선순위가 0이면 Sim++함수 중의 request 함수와 같은 식으로 동작하고, 1 또는 2의 값을 갖는 패킷에 대해서 우선 서비스를 하게 된다.[1]

이와 같이 동작하는 preempt 함수를 이용하면, 결과적으로 정체나 신호대기의 경우 앞 센서 노드 큐에 이전 패킷이 차 있게 될 때 preempt 함수를 이용하여, 맨 앞의 패킷은 앞 큐로 전진하지 못하도록 하고, 빠져나온 큐의 맨 앞에서 맴돌게 하면서 앞 큐가 차량 흐름이 재개되어 비게 되면 preempt 함수를 풀어주어 패킷이 앞 큐로 전진하도록 구현할 수 있다.

3. TDMA MAC 구현

실시간 주행 상황 정보 제공을 위한 MAC 프로토콜을 구현하기 위해 간섭은 없으며 시간 지연은 줄일 수 있는 그림 6과 같이 동작하는 TDMA 기반의 MAC이 시뮬레이터에 구현되었다. 구현된 시뮬레이터의 동작은 가장 먼저 비컨을 발생 시키는 Bstart()함수가 호출되면, Bstart()함수 안에서 비컨 타임 슬롯이 끝날 때 호출되는 함수 BTsEnd()함수, 비컨 간격이 끝나는 시점에 호출되는 BEnd()함수가 각각 예약된다. 그리고 BTsEnd()함수가 호출되면 DStart()함수가 2ms 단위로

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters.

Parameter	Value
heavy traffic average arrival rate (차량/min)	4.04대/min
heavy traffic peak arrival rate(차량/min)	9.1대/min
light traffic average arrival rate(차량/min)	0.45대/min
light traffic low arrival rate(차량/min)	0.017대/min
시뮬레이션 노드 수(개)	18개
평균 시뮬레이션 시간(hour)	24시간
붉은색 정지 신호등 유지 시간	3분
파란색 이동 신호등 유지 시간	1분

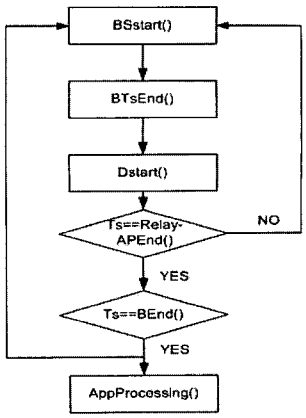

그림 6. 시분할 다중접속 MAC 프로토콜 동작 흐름도
Fig. 6. Flow chart of TDMA MAC Protocol operation.

Relay-AP간 데이터 전송에 이용하는 타임 슬롯이 끝날 때까지 계속 호출되어 해당 타임 슬롯에 전송할 데이터가 있으면 전송하게 된다. 그러나 만약 채널 에러와 같은 에러가 발생하여 재전송이 필요한 경우에는 재전송 구간을 통해 데이터를 재전송하게 된다.

V. 시뮬레이션 및 성능 평가

1. 시뮬레이션 환경 및 실행

시뮬레이션에 사용한 트래픽은 각 차선별로 10개의 검지기를 통해서, 일주일간 측정된 70개의 실측값을 통해서 만들어진 데이터를 활용하여 표 2와 같은 시뮬레이션 파라미터를 도출하였다.

2. 시간지연 분석

제안하는 MAC 프로토콜은 hybrid tracking 모드로서 모드 천이 카운트와 트래픽 패턴에 따라서 tracking 모드와 non-tracking 모드 두 가지 경우의 지연 특성을 모두 갖는다. 즉 hybrid tracking 모드는 모드 천이 카

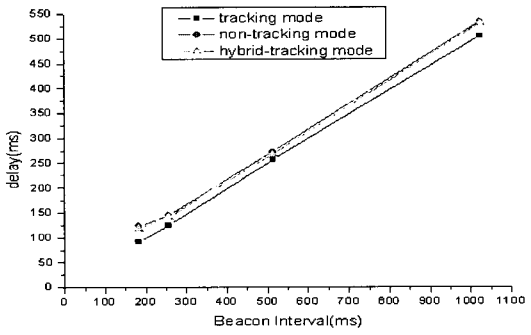

그림 7. 많은 트래픽에서 BI에 따른 지연 시간 비교
Fig. 7. Delay comparison for varying BI in heavy traffic.

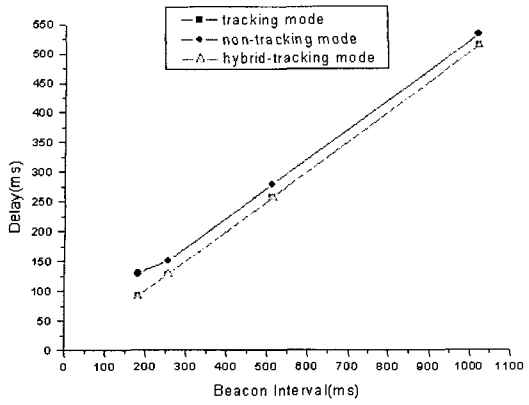

그림 8. 적은 트래픽에서 BI에 따른 지연 시간 비교
Fig. 8. Delay comparison for varying BI in light traffic.

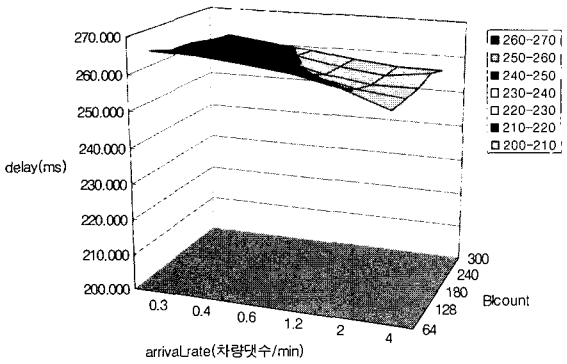

그림 9. Arrival rate, BI count에 따른 지연시간 (BI=512ms)
Fig. 9. Delay for various arrival rate and BI count.

운트와 트래픽의 도착 비율 (arrival rate)이 각각 크면 클수록 그림 7과 같이 tracking 모드를 더 오래 유지하며, 반대로 모드 천이 카운트와 트래픽의 도착 비율이 낮으면 낮을수록 그림 8과 같이 더 자주 non-tracking 모드로 동작한다. 그림 9는 트래픽 도착 비율, 모드 천이 카운트, 지연과의 관계를 나타내는 3차원 그래프이다. tracking과 non-tracking 모드 중 어느 방식으로 동작하든지 최대, 최소 지연 값의 차이는 제안하는 방식에서 10msec 정도로 나타난다. 이것은 hybrid-tracking 모드를 사용하여 생길 수 있는 각 모드의 시간 지연 편차가 실시간 주행 상황 정보제공을 하는데 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3. 수신(RX) 전력 소모 및 센서 노드 수명

센서 노드의 수신(RX) 전력 소모는 비컨을 수신할 때 사용되는 전력소모를 나타낸다. 일반적으로 tracking 모드나 non-tracking 모드는 다양한 트래픽 패턴에 대해서 성능을 모두 만족하지 못한다.

시뮬레이션 분석 결과, 그림 10에서 파라미터 값인

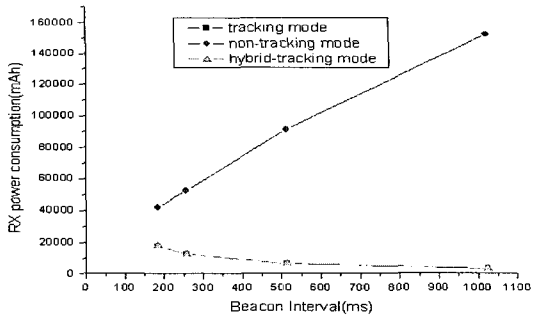

그림 10. 트래픽 도착 비율이 큰 경우의 수신 전력 소모
Fig. 10. RX Power Consumption in high arrival rate case.

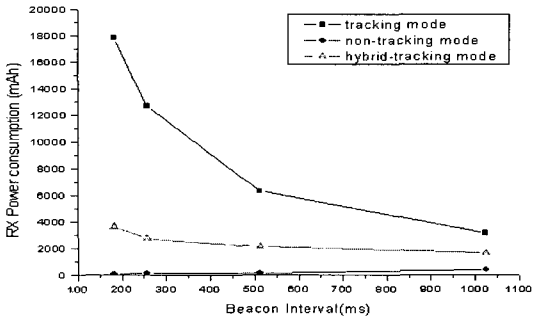

그림 11. 트래픽 도착 비율이 낮은 경우의 수신 전력 소모
Fig. 11. RX Power Consumption in low arrival rate case.

트래픽 도착 비율(9.1대/minute)이 크다는 것은 센싱 데이터가 많다는 것을 의미한다. 이 경우 non-tracking 모드는 비컨 간격이 늘수록 수신 전력 소모는 늘어나게 된다. 그것은 non-tracking 모드의 경우 이벤트가 발생하게 되면, 그때 AP와의 동기를 맞추기 위해 트리거링 되어 비컨을 찾게 되는데, 확률적으로 평균 BI/2의 시간 후에 동기를 맞추게 된다. 그러므로 비컨 간격이 커지면 커질수록 동기를 맞추는데 걸리는 시간은 늘어나게 되며, 동기를 맞추기 위해 비컨을 찾으며 사용되는 수신 전력 역시 비컨 간격이 커질수록 늘어나게 된다. 반면, hybrid tracking 모드의 경우에는 비컨 간격이 512ms이고, 모드 천이 카운트가 128인 경우 하나의 이벤트 센싱 후 약 65초가량을 tracking을 하면서 이벤트를 기다리게 되므로 트래픽 도착 비율이 9.1대/minute인 경우는 모드 천이 카운트가 타임아웃이 되기 전에 계속해서 이벤트가 발생하게 된다. 이와 같은 경우 제안하는 hybrid tracking 모드는 그림 10과 같이 tracking 모드와 같은 모습으로 동작하게 된다.

또한 트래픽 도착 비율(0.07대/minute)이 적을 때는 트래픽 도착 비율이 클 때와는 반대로 non-tracking 모드가 가장 적은 전력을 소모한다. 그것은 센싱 데이터가 있을 때만 데이터를 전송하는데, 트래픽 도착 비율

표 3. 예상 수명
Table 3. Expected Lifetime.

arrival rate	RX(mAS)	TX(mAS)	일	년
4.0대/분(min)	6356.038	271.026	4780.379	13.097
1.2대/분(min)	6444.292	83.868	4852.822	13.295
0.6대/분(min)	5916.385	39.515	5319.119	14.573
0.4대/분(min)	5478.520	26.819	5754.414	15.766

표 4. 손실 채널에서의 패킷 손실률
Table 4. Packet loss ratio in lossy channel.

	1%	2%	3%	4%	5%
loss packets(byte)	87	300	645	1419	2088
전송 실패율(%)	0.0001	0.0004	0.001	0.0022	0.0032

이 낮으므로 전송될 센싱 데이터 자체가 적기 때문이다. 그림 11에서 non-tracking 모드의 경우 가장 적은 수신 전력 소비를 나타내고 있다. 그러나 tracking 모드의 경우에는 센싱 데이터의 발생과 상관없이 계속 비컨을 수신하게 된다. 이때, 비컨 간격이 커지면 비컨을 수신하는 횟수가 적어짐을 의미하므로 비컨 간격이 커질수록 tracking 모드의 경우 수신 전력 소모량 역시 줄어든다. 하지만, 시뮬레이션 결과 비컨 간격이 1024ms로 커진 경우에도, tracking 모드의 경우 hybrid tracking 모드 보다 2000mAh만큼 전력을 더 사용하게 되어 센서 노드의 수명을 떨어뜨리게 된다.

결과적으로 트래픽 도착 비율이 크고, 비컨 간격이 작을수록 비컨을 수신해야하는 시간이 길어지므로 수명이 점점 줄어든다. 반대로 트래픽 도착 비율이 낮고, 비컨 간격이 크면 클수록 비컨을 수신해야하는 시간이 짧아지므로 노드의 수명은 늘어난다. 하지만, 실시간 응용을 지원하기 위해서는 512ms 이상의 경우에는 센서노드에서 AP까지의 데이터전송 지연이 길어지기 때문에 사용이 곤란하다.

RF 모듈을 Chipcon 사의 CC2420을 모델로 하고 CC2420의 소비 전력 특성을 이용하여 제안하는 MAC 프로토콜을 이용했을 때의 센서노드의 수명을 예상하였다. 배터리의 용량이 8800mAH 이고, RF 모듈의 송신 전력소비가 17.4mA, 수신 전력소비가 18.8mA이다. 이럴 때 MAC 프로토콜의 비컨 간격을 512ms, 모드 천이 카운트를 128로 셋팅하고, 외부 교통량을 나타내는 트래픽 도착 비율이 0.4~4.0으로 형성될 때 제안하는 MAC 프로토콜을 이용하여 24시간 시뮬레이션 후 예상한 센서노드의 예상 수명은 표 3과 같이 각각 13~15년의 예상 수명을 제공할 수 있다. 다만 표 4에 예상 수명은 RF 모듈만을 고려하여 산정된 값이므로 센서노드의 마이크로컨트롤러와 감지부분인 마그네틱 센서에서 사용하는 전력을 감안하면 실제 수명은 이보다는 줄어들 것이다.

4. 패킷 손실 분석

제안하는 MAC은 채널 에러나, 전송된 데이터에 대한 에러에 대해서 보상하기 위해 재전송 기능을 가지고 있다. 에러 채널에 의해서 해당 데이터를 재전송까지 하고 난 후의 최종적인 전송 실패율은 표 4와 같다. 이는 전송 시 생길 수 있는 어떤 에러에 대해서든지 5%까지는 총 데이터의 99.99%를 전달할 수 있음을 보여준다. 재전송이 같은 슈퍼 프레임 내에서 이루어지므로 채널 에러로 인해 재전송하는 경우 발생하는 지연시간은 미미하다. 중요한 정보는 그림 12와 같이 전송된 데이터가 알람을 알리는 데이터이고, 패킷 유실로 인해서 알람을 알릴 수 없는 missed-alarm인 경우이다. 하지만 채널 에러가 가장 나쁜 경우인 20%의 전송 에러가 발생하더라도 시뮬레이션 결과 missed-alarm이 3.6%에 불과하다. 이는 제안하는 MAC이 채널 에러에 대해 알람 데이터를 안정적으로 전달함을 나타낸다.

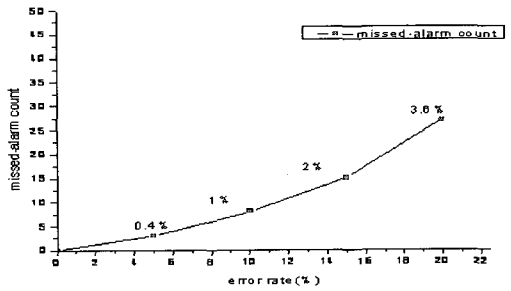

그림 12. 에러율에 따른 missed-alarm 횟수
그림 12. Counts of missed-alarm with varying error rate.

5. 토폴로지와 알람

비컨 간격이 변할 때 정지선과 첫 센서 노드 간에 필요한 이격 거리를 표 5에 진한 색으로 표시하였다. 이는 토폴로지 구성 시 구조적인 missed-alarm을 없애기 위해서 반드시 필요한 이격거리이다.

Successful-alarm 이란 운전자에게 성공적으로 경고를 전달하는 경우이다. 비컨 간격이 512ms일 때 그림 13에 나타낸 것과 같이 속도가 빠르고, 정지선이 짧으면 successful-alarm이 줄어드는데 이것은 AP로 보고

표 5. 알람, BI, 이격거리와의 관계

Table 5. Relation of alarm, BI and distance.

	Successful -alarm	Missed -alarm	Successful -alarm	Missed - alarm	Successful -alarm	Missed -alarm	Successful -alarm	Missed -alarm
	701	**0**	536	162	0	683	0	698
	709	0	712	**0**	194	526	0	697
	706	0	699	0	551	223	0	748
	733	0	744	0	755	15	50	672
	739	0	775	0	739	**0**	176	601
	720	0	751	0	740	0	498	283
	318	0	440	0	696	0	752	28
	0	0	60	0	369	0	765	**0**

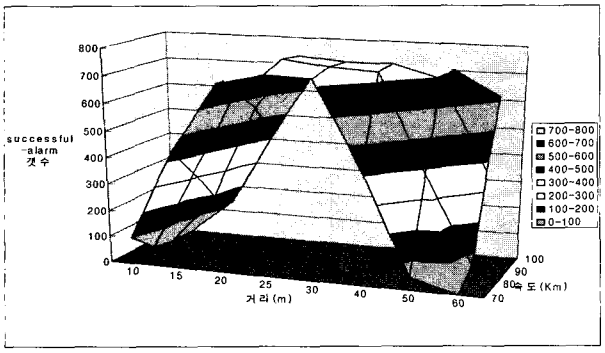

그림 13. 거리, 속도에 따른 successful-alarm 횟수

Fig. 13. Successful alarm counts for varying speed and distance.

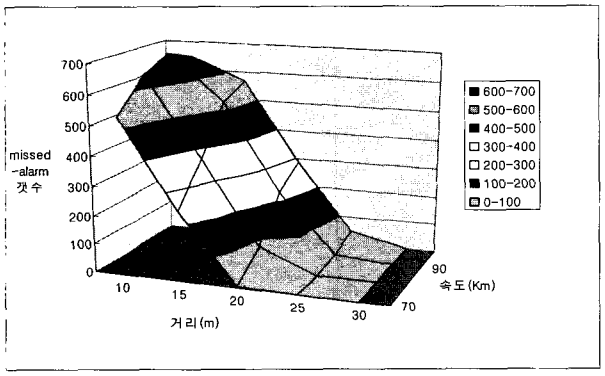

그림 14. 거리, 속도에 따른 missed-alarm 횟수

Fig. 14. Missed-alarm counts for varying speed and distance.

하는데 걸리는 MAC 계층의 지연 시간에 비해 해당 알람을 전달하기에는 차량의 속도가 크고, 정지선거리가 너무 짧아 모두 missed-alarm으로 되는 경우이다. 60m 이상에서는 100Km에 대해서도 충분한 정지선 거리를 확보하므로 알람 요건 자체가 성립 되지 않기 때문에 successful-alarm 자체도 없어진다.

missed-alarm은 그림 14에서와 같이 차량의 속도가 빠르고, 정지선과 정지선 가장 가까운 센서 노드와의 거리가 짧아질수록 증가한다. 그것은 센싱 데이터를 전달하여, 운전자에게 경고를 하기에는 이미 운전자의 차량 속도가 빠르고 정지선까지의 이격거리가 너무 짧아 경고를 하기 전에 이미 정지선을 지나갔기 때문이다. 시뮬레이션 결과 비컨 간격이 512ms인 경우, 대부분의 차량 속도에 대해 missed-alarm이 없는 정지선까지 거리는 30m이다. 그러나 이것은 시뮬레이션 결과로서 이상적인 값이며, 실제 토폴로지는 각종 차량 성능과, 노면 상태, 운전자의 연령 및 상태에 따른 반응 성능을 고려한 50m가 적당할 것이다.

VI. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 USN 기반의 실시간 주행 상황 정보 시스템의 요구 사항 즉, 단일 홉 떨어져 있는 센서 노드의 이벤트가 hard-bounded 지연 시간 내에 AP로 전달되어야 한다는 조건, 그리고 전력 소모 감소 및 무선 채널 에러에 대한 대책이 마련되어야 한다는 점을 만족시키기 위한 TDMA 기반의 MAC 프로토콜을 제안하였다. 그리고 이의 성능 검증을 위해 큐잉 시뮬레이터인 sim++로 시뮬레이터를 개발하고 다양한 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 도출된 결과를 분석하였다.

개발된 MAC 프로토콜에서는 AP와 센서 간의 전송 범위가 미치지 못하는 경우를 대비해 릴레이를 설치하는 경우, 수용할 수 있도록 MAC 프로토콜을 확장하였고 최대한 센서 노드들의 수명을 연장하기 위해 통신이 이루어지지 않는 동안 수면상태로 들어가게 하고 차량의 연속적인 검출 여부에 따라 센서 노드들이 비컨 tracking 모드와 non-tracking 모드를 교대로 운영될 수 있는 hybrid tracking 모드를 채택하였다. 또한 개발된 시뮬레이터를 이용하여, 차량의 시간대별 트래픽 유입량을 분석한 자료에 근거해 실제 트래픽 조건에서 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 MAC 프로토콜이 실제 실시간 주행 상황 정보 제공 응용의 요구 조건을 만족함을 보였다. 즉, 전력 소모를 줄이면서도 제한된 지연 시간 내에 센싱 이벤트 처리가 가능함을 보였다. 또한 시뮬레이션을 통해 센서 노드와 정지선과의 관계를 이용하여 토폴로지에 따른 알람과 토폴로지 구성의 가이드라인을 제공하였다.

향후 남아있는 과제로는 제안된 MAC 프로토콜이 실제 테스트베드 상에서도 제한된 지연 시간 내에 동작이 이루어져 현장에 도입 가능한지 검토하기 위해 시뮬레이션이 아닌, 실제 센서노드와 AP에 적용 및 구현하여 실험하는 것이다.

참 고 문 헌

[1] Paul A. Fishwick "Simulation Model Design and Execution" prentice hall, 1995.
[2] 강정훈, 유준재, 윤명현, 이민구, "센서 네트워크 및 애플리케이션 기술 동향", 대한전자공학회 제 32권 제 7호, pp. 786 - 799, 2005년 7월
[3] http://www.sensysnetworks.com
[4] 김재현, 김석규, 이재용, "무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율성을 고려한 MAC/라우팅 프로토콜", 전자공학회지 제 32권 제 7호, pp. 825-841, 2005년 7월
[5] IEEE 802.15.4 for wireless sensor networks : A Technical overview, Anis Koubaa, Mario Alves Eduardo Touar, July 2005.
[6] IEEE 802.15.4 IEEE Standard. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(WPANs), 2006.
[7] Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari, Cauligi S. Raghavendra, "Performance Evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for Low-Rate Low-Power Wireless Networks" Performance, Computing, and Communications, IEEE International Conference. 2004 .
[8] Data Sheet for CC2420 2.4Ghz IEEE 802.15.4/Zigbee RF Transceiver, available online at http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_Sheet _ 1_0 .pdf

저 자 소 개

박 만 규(학생회원)
1999년 공주대학교 물리학과 학사
2001년 공주대학교 전기전자 정보통신공학과 석사
2001년~2004년 시스윌 기업부설 통신기술 연구소 전임연구원
2004년~2006년 케이디넷 통신사업본부 기술팀 전임연구원/대리
2007년~현재 충남대학교 전자전파정보통신 공학과 박사과정
<주관심분야 : 이동통신 네트워크, 데이터 통신 센서네트워크>

소 상 호(학생회원)
2007년 충남대학교 전자전파 정보통신공학과 학사
2007년~현재 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사과정
<주관심분야 : 이동통신 네트워크, 데이터 통신, 센서 네트워크>

임 재 한(정회원)
2004년 서울대학교 전기공학부 학사
2006년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2006년~현재 한국전자통신연구원텔레매틱스/USN연구단 연구원
<주관심분야 : 무선 네트워크 성능분석, 무선망 라우팅 및 다중 접속 기술, 센서 네트워크>

김 병 철(평생회원)-교신저자
1988년 서울대학교 전자공학과 학사
1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1996년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
1993년~1999년 삼성전자 CDMA 개발팀
1999년~현재 충남대학교 정보통신공학부 부교수
<주관심 분야 : 이동인터넷, 이동통신 네트워크, 데이터통신, 센서네트워크>

이 재 용(평생회원)
1988년 서울대학교 전자공학과 학사
1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
1990년~1995년 디지콤 정보통신 연구소 선임연구원
1995년~현재 충남대학교 정보통신공학부 교수
<주관심분야 : 초고속통신, 인터넷, 네트워크 성능분석>

손 명 희(정회원)
1998년 충남대학교 항공우주공학과 학사
2000년 충남대학교 컴퓨터공학과 공학석사
2005년 충남대학교 정보통신공학과 공학박사
2000년~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
<주관심분야 : 유.무선 통신 프로토콜, MPLS, 이더넷, RFID/USN, Convergence Technology>