

IEEE 802.15.4 무선 스타 센서 네트워크에서 비콘 신호 주기에 따른 센서 노드 전력소모량 분석

준회원 유영대*, 최정훈**, 종신회원 김남**

Power Consumption Analysis of Sensor Node According to Beacon Signal Interval in IEEE 802.15.4 Wireless Star Sensor Network

Young-dae Yoo*, Jung-hun Choi** Associate members, Nam Kim** Lifelong Member

요약

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜을 사용하는 스타 센서 네트워크에서 각각의 센서 노드에서 소모되는 전력을 분석 파라미터별로 연관성과 전력소모에 미치는 영향을 분석하였다. 성능분석을 위하여 데이터 전송과정에 소요되는 시간과 평균 송수신 전력량으로 센서 노드 전력소모량을 수식으로 전개하였으며, CSEM에서 제작한 WiseNET 시스템 측정값을 활용하였다. 모의실험결과 단일 센서 네트워크보다 10개의 센서 노드로 이루어진 센서 네트워크에서 전력소모가 평균 20% 증가 했으며, 비콘 신호 주기가 0.1초일 때 up-link가 down-link보다 평균 2.5배 전력소모가 많았다. 비콘 신호 주기가 1초일 때 센서 노드 수가 100개로 증가하거나, 센싱 데이터가 100 byte로 증가하면 전력소모량이 약 2.3배 증가 하였으며, 868/915 MHz가 2.4 GHz보다 6~12배 전력소모량이 많았다.

Key Words : Power Consumption, Sensor Network, Zigbee, IEEE 802.15.4

ABSTRACT

In this paper, The correlation of the power consumption of sensor node is analyzed according to the analyze parameter in IEEE 802.15.4 star sensor network. And It is studied the influence on analysis parameter. The power consumption of sensor network in transmission process and average transmission power consumption drives to numerical formula. And CSEM WiseNET system measurement value is used. As a simulation result, The power consumption of sensor node in star network consist of 10 sensor nodes is more than 20 % that in single network in average. When beacon signal interval is 0.1 second in all frequency bands, the power consumption of sensor node in up-link is more than 2.5 times that in down-link in average. When beacon signal interval is 1 second and the number of sensor nodes increases to 100 and sensing data increases to 100 byte, the power consumption of sensor node increases to 2.3 times. And The superior performance of 2.4 GHz frequency band has than 868/915 MHz frequency band up to 6~12 times.

I. 서론

최근에 유비쿼터스의 개념이 전 산업분야에 확대가 되면서 홈 네트워크 및 홈오토메이션, 홈 헬스케

어 등에 사용되는 센서 네트워크에 대한 연구가 활발히 진행되었다^{1, 2, 3}. 센서 네트워크는 기존 광대역 네트워크에서 대량의 데이터를 송신하는 것과 다르게 소량의 센싱 데이터를 일정한 시간 주기 또

* KT (koamma91@paran.com)

** 충북대학교 정보통신공학과 (jhchoi@osp.chungbuk.ac.kr, namkim@chungbuk.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-01-051, 접수일자 : 2006년 1월 27일, 최종논문접수일자 : 2006년 9월 18일

는 이벤트 발생시 데이터를 송신하게 된다. 그리고 센서 노드는 사용되는 목적상 한번 물리적 공간에 배치가 되면 장기간동안 배터리의 교체 없이 주기적으로 정보를 수집하고 필요시 관련 디바이스를 제어 하는 역할을 포함한다. 이러한 특성으로 인하여 센서 노드에서 소모되는 전력을 최소화하여 센서 노드의 수명을 증가시키는 것이 매우 중요하다. IEEE 802.15.4 WPAN(wireless personal area network)에서는 센서 노드가 요구하는 성능에 대해서 표준을 제시하고 있으며, 네트워크의 유연성과 확장성, 저 전력, 저렴한 가격을 동시에 요구하고 있다⁴⁾. 이에 Chipcon, ZMD, ComPx, Philips, Freescale, Atmel, Ember 등과 같은 칩 제조사들은 표준규격에 맞춘 송수신 모듈을 상용 제품으로 생산하고 있다.

최근까지 저 전력으로 작동되는 무선 센서 네트워크에 대한 연구는 MAC 프로토콜 알고리즘을 개선하는 분야에서 대부분 이루어지고 있다. 이에 대한 연구는 센서 노드의 대기 시간을 증가시키거나 데이터 수신시점에 대한 정보를 미리 수신기에 전달하여 해당 시간만 수신기를 작동하여 데이터를 수신하는 기술 등이 연구되고 있다^{5, 6, 7, 8)}.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 기준을 준용한 MAC 프로토콜을 사용하고, 무선 센서 네트워크의 센서 노드에서 소모되는 전력을 분석 파라미터별로 성능을 분석하였다. N개의 센서 노드로 구성된 스타 센서 네트워크를 고려하였고, 분석을 위하여 전송과정별로 시간을 구분하여 수식을 도출하였다. 모의실험을 통해 IEEE 802.15.4 물리적 계층에서 규정하고 있는 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 3가지 주파수 대역에 대한 센서 노드의 전력소모량 특성을 파악하였다. 그리고 센서 노드의 전력소모량과 비콘 신호의 주기, 센서 노드의 수, 센서 측정 데이터 및 제어 데이터 크기와 같은 분석 파라미터와 상관관계를 해석하였다.

II. IEEE 802.15.4 및 저 전력 프로토콜

2.1 IEEE 802.15.4 PHY 및 MAC 계층

IEEE 802.15.4 물리적 계층(physical layer)에서는 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 3가지 주파수 대역에 대해서 정의하고 있다. 확산방식으로는 직접 시퀀스확산스펙트럼방식을 사용하고 있으며, 수신 에너지를 검출하고, 네트워크 품질 지시 및 채널배정을 초기화 시키는 기능을 포함하고 있다⁴⁾. 2.4

표 1. IEEE 802.15.4 물리적 계층 주파수 대역별 특징

PHY	주파수 밴드 (Hz)	채널수	확산 파라미터		데이터 파라미터		
			Chip Rate	변조	Bit Rate	심볼 Rate	변조
868 MHz	868M ~ 870M	0 (1)	300 Kchip/s	BPSK	20 Kbps	20K baud	BPSK
915 MHz	902M ~ 928M	1-10 (10)	600 Kchip/s	BPSK	40 Kbps	40K baud	BPSK
2.4 GHz	2.4G ~ 2.483G	11-26 (16)	2.0 Mchip/s	O-QPSK	250 Kbps	62.5K baud	16-ary Orthogonal

GHz ISM(industrial, scientific, medical) 대역에서는 250 Kbps의 데이터 전송율과 16개의 채널을 보유하고 있고, 915 MHz ISM 대역에서는 40 Kbps의 데이터 전송율과 10개의 채널을 사용할 수 있다. 유럽지역에서 사용하는 868 MHz ISM 대역에서는 20 Kbps의 데이터 전송율과 1개의 채널을 사용한다^{4, 9, 10)}.

MAC 계층에서는 네트워크 구성과 해제를 제공하고, 비콘 신호, 슈퍼프레임, 높은 통신 우선권을 가지는 GTS(guaranteed time slot) 등과 같은 기능에 대하여 정의한다. 채널 접속을 위한 방법으로 반송파감지다중접근/충돌회피(carrier sense multiple access with collision avoidance)방식을 이용하고 있으며 최대 2^6 센서 노드 네트워크 또는 간단하게 2^{16} 개의 센서 노드 네트워크를 구성할 수 있는 64-bit long, 16-bit short 주소 체계를 갖는다⁴⁾. 디바이스 구성은 네트워크 코디네이터(network coordinator), 완전기능디바이스(full function device), 축소기능디바이스(reduced function device) 3개의 디바이스로 구성된다. 완전기능디바이스는 유선의 전원을 사용하며 네트워크 계층에서의 스타, 메시, 스타 트리 구조로 어떠한 형태의 네트워크도 구성이 가능하다. 또한, 네트워크를 전체적으로 관리하고 통제하는 네트워크 코디네이터가 될 수 있고 완전기능디바이스와 축소기능디바이스와 같은 디바이스와 중계 접속을 수행한다. 축소기능디바이스는 배터리 전원을 사용하며 네트워크를 구성하는데 제한되고 코디네이터에게만 접속할 수 있다. MAC 계층에서 사용되는 프레임은 매우 간단한 구조로 데이터(data), 응답(acknowledgement), MAC 명령(mac command), 비콘(beacon) 프레임으로 구성되며, 각각의 역할에 따라 up-link와 down-link에 복합적으로 사용된다^{4, 10)}.

2.2 저 전력 MAC 프로토콜

저 전력 MAC 프로토콜은 T-MAC(timeout MAC), S-MAC(sensor MAC)에 이어 최근에는 WiseMAC(wireless Sensor MAC) 방법이 연구되었다^{7, 8, 11}. T-MAC은 유휴대기시간에 소모되는 전력을 감소시키기 위해 센서 노드들이 일정한 주기를 갖고 데이터를 송수신하게 되며, 데이터 송수신이 없을 경우에는 적응충격계수(adaptive duty cycle) 방법을 사용하여 슬리핑 모드로 전환한다. S-MAC은 센서 노드에서 주기적으로 수신과 슬리핑 모드로 전환하여 전력소모를 줄이고 RTS(request to send)/CTS(clear to send) 방식과 NAV(network allocation vector) 방식을 사용하여 충돌을 회피하며, 대용량 데이터는 분할하여 송신하는 방법을 사용한다. WiseMAC은 전두(preamble) 샘플링에 기반을 둔 동기화된 반송과감지다중접속방식으로 트래픽의 크기에 따라 전력소모가 능동적인 저 전력 프로토콜이다^{8, 11}. 저 전력 MAC 프로토콜에 사용된 알고리즘으로는 PTIP(periodic terminal initiated polling)방식과 PSM(power save mode)방식, WiseMAC 방식으로 구분한다¹². 첫 번째로 PTIP 방식은 코디네이터에서는 데이터를 우선적으로 버퍼링을 한다. 센서 노드가 주기적으로 코디네이터에게 데이터를 요청하면 버퍼에 있던 데이터를 센서 노드에게 송신하고, 버퍼에 데이터가 없을 경우에는 짧은 컨트롤 패킷만을 전송한다. 센서 노드간 데이터 요청 패킷 충돌을 회피하기 위하여 CSMA 프로토콜을 사용하고, 센서 노드를 동기화 하여 일정한 간격을 두고 데이터를 요청하게 된다. 두 번째 PSM 방식은 IEEE 802.11과 IEEE 802.15.4에 적용된 방식으로 비콘 신호 사용과 수신대기 방법이 사용된다. 코디네이터에서 주기적으로 비콘 신호를 송신하면 모든 센서 노드는 비콘 신호를 수신하여 자신의 주소가 포함되어 있는지 확인한다. 자신의 주소가 포함되어 있으면 코디네이터에게 데이터를 요청하고, 없다면 대기 모드로 전환되어 전력을 줄이는 방법이다. 세 번째 WiseMAC 방식은 코디네이터가 능동적으로 각 센서 노드의 활성화 시간에 맞추어 데이터를 전달하는 방법으로 유휴대기, 불필요한 데이터 송신과 수신, 충돌에 소모되는 전력을 줄일 수 있다.

III. 시스템 모델링 및 센서 노드 전력소모량 분석

3.1 시스템 모델링

본 논문에서 고려된 WPAN 네트워크는 유선에 연결된 코디네이터 1개와 N개의 센서 노드로 이루어지고 비콘 모드를 사용하는 스타 센서 네트워크를 가정하였다. 스타 센서 네트워크는 구조가 가장

간단하고 적은 비용으로 구성이 가능하며 전력소모가 적은 특징이 있다. N개의 센서 노드는 코디네이터에게 센서로부터 측정된 센싱 데이터 패킷을 송신하며, 코디네이터는 유선으로부터 받은 제어 데이터 패킷을 센서 노드에게 전송하는 일련의 과정을 모델링하였다. 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 주파수 대역의 물리적 계층은 동일하며, 유휴 전력이나 데이터 송수신시에 소모되는 전력 또한 동일한 것으로 가정하였다. 센서 노드가 송신하거나 수신하지 않는 상태로 코디네이터의 요청이나 필요시 자체적으로 송수신기가 활성화되어 데이터를 수신 또는 송신 할 수 있는 상태를 DOZE, 센서 노드가 데이터를 수신 하는 상태를 R_X , 센서 노드가 데이터를 송신하는 상태를 T_X 라 정의한다. DOZE 상태에서 R_X 상태로 전환될 때 증가되는 전력소모량 P_R , DOZE 상태에서 T_X 상태로 전환될 때 증가되는 전력소모량 P_S 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다⁶.

$$P_R = P_{Receive} - P_{Doze}$$

$$P_S = P_{Send} - P_{Doze} \quad (1)$$

$P_{Receive}$ 는 R_X 상태에서 소비되는 전력, P_{Send} 는 T_X 상태에서 소비되는 전력, P_{Doze} 는 DOZE 상태에서 소비되는 전력을 의미한다. 데이터 전송과정에서 소요되는 시간을 DOZE 상태에서 송수신기가 R_X 또는 T_X 모드로 전환되는 초기 시간을 T_S , 비콘 신호 수신 시간과 제어 패킷 송신 시간을 T_C , 센서 노드가 R_X 와 T_X 로 전환되는 시간을 T_T , 승인 신호가 전송되는 시간을 T_A 로 모델링 한다.

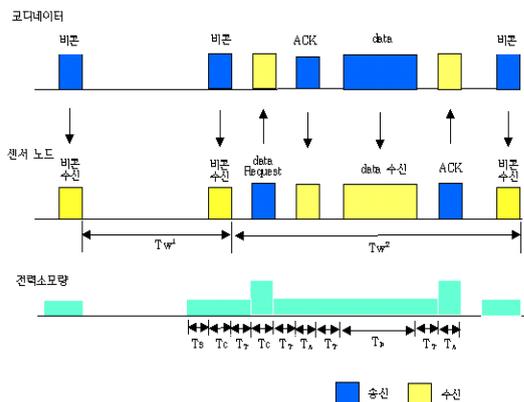


그림 1. IEEE 802.15.4 down-link 모델 및 전력소모량

3.2 down-link 전력소모량

센서 노드는 코디네이터에서 송신되는 비콘 신호를 수신하고 분석하여 자신의 어드레스가 포함되어 있을 경우에만 수신기를 활성화하여 데이터를 수신 하게 된다. 센서 노드는 일정한 시간 간격으로 송신되는 비콘 신호를 수신하기 위해서 DOZE 상태에서 R_x 상태로 전환하여 수신준비를 한다. 코디네이터 시간과 센서 노드 시간 간에 발진기에 따라 1초당 $\pm\theta$ 만큼의 시간차이가 발생한다고 하면 센서 노드에서는 발진기 시간차를 극복하기 위해 2θ 의 시간만큼 먼저 수신기를 R_x 상태로 전환하여야 한다. 센서 노드와 코디네이터 간의 시간 차이에 의해 발생한 전력소모량 P_{Clock} 은 식 (2)와 같다.

$$P_{Clock} = 2\theta(P_{Receive} - P_{Doze}) = 2\theta P_R \quad (2)$$

2θ 의 시간 뒤에 센서 노드는 비콘 신호를 수신하고 자신의 어드레스가 포함되어 있는지를 분석하게 된다. 센서 노드에서 비콘 신호 주기 T_W^1 동안 비콘 신호를 수신하는데 소모되는 전력 P_{Beacon} 은 식 (3)과 같다.

$$P_{Beacon} = \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^1} \quad (3)$$

비콘 신호 수신 이후에 센서 노드는 코디네이터에게 데이터를 요청하는 제어 패킷을 송출하게 된다. 센서 노드에서 비콘 신호 주기 T_W^0 동안 코디네이터에게 데이터 요청 패킷을 전송하는데 소모되는 전력 $P_{Pending}$ 은 식 (4)와 같다.

$$P_{Pending} = \frac{T_T P_R + T_C P_S}{T_W^0} \quad (4)$$

코디네이터는 데이터 요청신호에 대하여 정상적으로 수신했음을 알리는 승인 패킷을 송신 한다. 센서 노드에서 T_W^0 동안 응답 신호를 수신하는데 소모되는 전력 $P_{Receive_ACK}$ 은 식 (5)와 같다.

$$P_{Receive_ACK} = \frac{(T_T + T_A)P_R}{T_W^0} \quad (5)$$

코디네이터는 응답 신호를 송신한 이후 데이터 패킷을 센서 노드에게 송신한다. 데이터 패킷을 전송하는 시간을 T_{D-down} 이라 하면, 센서 노드에서 T_W^0 동안 제어 데이터 패킷을 수신하는데 소모되는

전력 P_{Data_down} 는 식 (6)과 같다.

$$P_{Data_down} = \frac{(T_T + T_{D-down})P_R}{T_W^0} \quad (6)$$

데이터 패킷을 정상적으로 수신한 센서 노드는 코디네이터에게 데이터를 정상적으로 수신했음을 알리는 응답 신호를 전송 한다. 센서 노드에서 T_W^0 동안 응답신호를 보내는데 소모되는 전력 P_{Send_ACK} 는 식 (7)과 같다.

$$P_{Send_ACK} = \frac{T_T P_R + T_A P_S}{T_W^0} \quad (7)$$

T_W^0 동안 두 번째 비콘 신호에 대한 발진기 시간 차이 소모전력 $P_{Clock'}$ 와 비콘 신호를 수신하는데 소모되는 전력 $P_{Beacon'}$ 은 식 (8)과 같다.

$$P_{Clock'} = 2\theta(P_{Receive} - P_{Doze}) = 2\theta P_R$$

$$P_{Beacon'} = \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^0} \quad (8)$$

DOZE 상태에서 소모되는 전력 P_{Doze} 와 식 (2)~(8)의 합이 첫 번째 비콘 신호 주기 T_W^1 와 두 번째 비콘 신호 주기 T_W^0 동안 센서 노드 down-link에서 소모하는 전력 P_{down} 이 된다.

$$P_{down} = P_{Doze} + 4\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^0} + \frac{(T_S + T_C)P_R + (T_A + T_C)P_S}{T_W^0} + \frac{(4T_T + T_A + T_{D-down})P_R}{T_W^0} \quad (9)$$

3.3 up-link 전력소모량

up-link 전송과정은 down-link보다 비교적 간단하게 구성되지만 센서 네트워크에서 가장 빈번히 일어나는 링크로 센서 노드 전력소모량에 큰 영향을 준다. up-link는 down-link와 마찬가지로 비콘 신호에 의해서 센서 노드가 수신기를 활성화 하고 비콘 신호를 수신 한다. 코디네이터와 센서 노드 발진기의 시간 차이로 인해 소모되는 전력 P_{Clock} 과 비콘

신호 주기 T_W^1 동안 비콘 신호를 수신하는데 소모되는 전력 P_{Beacon} 은 down-link의 식 (2), (3)과 동일하다. 센서 노드는 비콘 신호를 수신한 시점으로부터 센서로부터 센싱 데이터를 코디네이터에게 T_{D-up} 동안 송신하게 된다. 비콘 신호 주기 T_W^2 동안 데이터 패킷을 코디네이터에게 송신할 때 소모되는 전력 $P_{Data-up}$ 은 식 (10)과 같다.

$$P_{Data-up} = \frac{T_T P_R + T_{D-up} P_S}{T_W^2} \quad (10)$$

센서 노드로부터 데이터를 수신한 코디네이터는 정상적인 데이터 수신에 대하여 응답 신호를 센서 노드에게 송신한다. T_W^2 동안 응답 신호를 수신하는데 소모되는 전력 $P_{Receive-ACK}$ 은 식 (5)와 동일하다.

T_W^2 동안 두 번째 비콘 신호에 대한 발진기 시간 차이 소모전력 P_{Clock} 와 비콘 신호를 수신하는데 소모되는 전력 P_{Beacon} 은 식 (8)과 동일하다.

첫 번째 비콘 신호 주기 T_W^1 과 두 번째 비콘 신호 주기 T_W^2 동안 센서 노드 up-link에서 소모하는 전력 P_{up} 은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{up} = P_{Doze} + 4\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^1} + \frac{T_{D-up} P_S + (2T_T + T_A + T_S + T_C)P_R}{T_W^2} \quad (11)$$

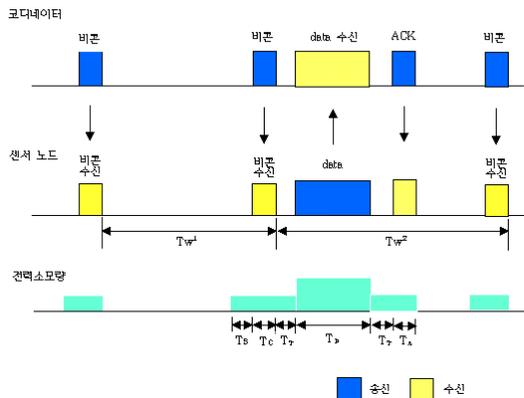


그림 2. IEEE 802.15.4 up-link 모델 및 전력소모량

3.4 N개의 센서 노드를 고려한 down-link 및 up-link 전력소모량

스타 센서 네트워크에서 코디네이터는 순차적으로 센서 노드들에게 비콘 신호를 송신하여 센싱 데이터 및 제어 데이터 패킷을 송수신 하므로 1번째 및 2번째 비콘 신호는 센싱 또는 제어 데이터에 송수신하기 위해 사용되지만 3번째 비콘 신호부터는 불필요하다. 그러나 주기적으로 비콘 신호를 수신하고 분석하여야 하는 센서 노드는 (N-2)개의 불필요한 비콘 신호를 수신(overhearing)하여 전력을 소모하게 된다. 이때 소모되는 전력은 P_{Clock} , P_{Beacon} 과 동일하고 T_W^3 비콘 신호 주기부터 발생하게 된다. 3번째 비콘 신호부터 소모되는 전력 P_{Loss} 라 하면, 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Loss} = 2\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^3} + 2\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^4} + 2\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^5} \dots = \sum_{n=3}^N [2\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^n}] \quad (12)$$

그러므로 N개 센서 노드로 구성된 센서 네트워크에서 소모되는 down-link 및 up-link의 링크별 센서 노드 전력소모량 P_{down-N} , P_{up-N} 은 식 (9), (11)에 식 (12)을 합한 식 (13)이 된다.

$$P_{down-N} = P_{Doze} + 4\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^1} + \frac{(T_S + T_C + 4T_T + T_A + T_{D-down})P_R}{T_W^2} + \frac{(T_A + T_C)P_S}{T_W^2} + \sum_{n=3}^N [2\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^n}]$$

$$P_{up-N} = P_{Doze} + 4\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^1} + \frac{T_D P_S + (2T_T + T_A + T_S + T_C)P_R}{T_W^2} + \sum_{n=3}^N [2\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^n}] \quad (13)$$

3.5 IEEE 802.15.4 센서 노드 전력소모량

IEEE 802.15.4에서 사용하는 주파수 대역은 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 이며, 주파수 대역별로 확산 chip rate와 데이터 bit rate가 다르다. 주파수 대역별로 down-link와 up-link에서 사용되는 시간 파라미터 값을 868 MHz에서 사용된 값을 기준으로 정의하면[6], T_T 는 확산 chip rate에 따라 비례하며, T_S , T_A , T_C 는 데이터 bit rate에 따라 비례한다. 코디네이터에서 센서 노드로 전송하는 데이터 패킷이나 센서 노드에서 코디네이터로 전송하는 데이터 패킷 전송시간 T_{D-down} , T_{D-up} 은 전송 하고자 하는 데이터의 크기에 따라서 변화되며, 식 (14)와 같다.

$$T_{D-up} = T_{D-down} = \frac{(15 + DATA) \times 8}{Bit Rate} \quad (14)$$

N개의 센서 노드로 구성된 스타 센서 네트워크에서 코디네이터는 각 센서 노드에게 down-link와 up-link를 생성하게 되므로 총 2N번 비콘 신호를 센서 노드에게 송신한다. 첫 번째 센서 노드는 T_W^1 , T_W^2 , T_W^3 비콘 신호 주기 동안 센싱 데이터 패킷과 제어 데이터 패킷을 송수신 하게 되며, T_W^i 비콘 신호 주기부터는 불필요한 비콘 신호를 수신하게 된다. 그러므로 $P_{Loss'}$ 만큼의 전력을 추가적으로 소모하게 된다.

$$P_{Loss'} = \sum_{n=4}^{2N} [2\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^n}] \quad (15)$$

스타 센서 네트워크에서 한 개의 센서 노드에서 소모되는 전력소모량 P는 식 (9), 식 (11), 식 (15)를 합한 식에서 식 (8)을 차감한 식이 되며 식 (16)과 같다. BI (beacon interval)는 비콘 신호 주기를 말하며, SD (slot duration)는 비콘 신호 주기 내에서 데이터를 송수신할 수 있는 기간을 말한다.

$$\begin{aligned} P &= P_{up} + P_{down} + P_{Loss'} - (P_{Clock'} + P_{Beacon'}) \\ &= P_{Doze} + 6\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^1} \\ &\quad + \frac{T_{D-up}P_S + (2T_T + T_A + T_S + T_C)P_R}{T_W^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{(T_A + T_C)P_S + (4T_T + T_A + T_{D-down} + T_S + T_C)P_R}{T_W^3} \\ &+ \sum_{n=4}^{2N} [2\theta P_R + \frac{(T_S + T_C)P_R}{T_W^n}] \quad (16) \end{aligned}$$

up-link

$$T_S + T_C + 2T_T + T_A + T_D \leq SD \leq BI(T_W = T_W^1 \dots T_W^N)$$

down-link

$$T_S + 2T_C + 4T_T + 2T_A + T_D \leq SD \leq BI(T_W = T_W^1 \dots T_W^N)$$

3.6 배터리 사용 시간

배터리 모델은 제1차 전지, 제2차 전지, 제3차 전지로 구분하며. 본 논문에서는 가장 일반적으로 사용되고, 저가인 알카라인 배터리 모델을 적용하였다. 전체 배터리 전력을 E라 하고, 배터리 전력의 10%가 1년간 평균적인 누설전력으로 보았을 때 시간당 누설전력 $P_{AvgLeak}$ 는 식 (17)과 같다[8].

$$P_{AvgLeak} = \frac{0.1E}{24hour \times 365days} [Wh] \quad (17)$$

평균전력소모량을 P_{Bat} 라 할 때, 배터리가 완전 방전되는 시간 T는 식 (18)과 같다.

$$T = \frac{E}{P_{Bat} + P_{AvgLeak}} = \frac{E}{24h \times 365days \times P_{Bat} + 0.1E} [년] \quad (18)$$

E는 Wh의 단위이므로 배터리 단위인 Ah로 변환하고, 식 (18)에 대입하면 배터리의 사용시간을 도출할 수 있다. U는 평균 배터리 전압을 의미한다.

$$T = \frac{U \times BatteryAh}{24h \times 365days \times P_{Bat} + 0.1U \times BatteryAh} [년] \quad (19)$$

IV. IEEE 802.15.4 무선 센서 네트워크 MAC프로토콜 전력소모량 분석

매우 작은 크기와 한정된 배터리 용량을 가진 센서 노드는 물리적 공간에 배치되면 장기간 동안 배터리 교체 없이 운용되어야 한다. 센서 노드의 전력 소모는 비콘 신호의 주기, 센서 노드 수, 전송 데이터 크기, 사용 주파수에 따라 영향을 받게 되는데 에너지 효율적인 센서 네트워크를 구성하기 위해서는 센서 노드의 전력소모량과 각 분석 파라미터별

로 상관관계를 파악하는 것이 중요하다. 센서 노드의 전력 소모량을 분석하기 위하여 각 주파수 대역에 대한 up-link와 down-link에 대한 전력소모량을 전송 과정별로 시간을 분리하여 해석하였고, 단일 센서 네트워크와 N개의 스타 센서 네트워크 센서 노드 전력소모량을 비교하였다. 그리고 센싱 데이터 및 제어 데이터 패킷 크기, 비콘 신호 주기와 센서 노드 증가를 고려하여 센서 노드 전력소모량과 상호 연관성을 파악하였다.

주파수 대역별로 전력소모량 분석에 사용된 파라미터는 표 2와 같으며, 각 주파수 대역별 chip rate와 bit rate를 고려하여 파라미터 값을 결정하였다^[6].

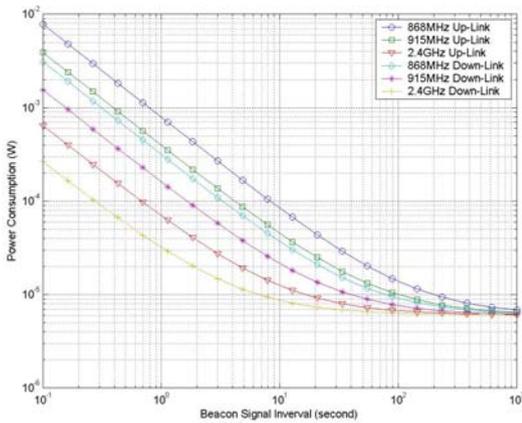


그림 3. 비콘 신호 주기에 따른 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz down-link 및 up-link 전력소모량 (up, down data = 50 byte, N = 10)

그림 3은 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 주파수 대역에서 센서 노드 수가 10개이고, 센싱 데이터와 제어 데이터 크기가 50 byte일 때 비콘 신호 주기에 따른 up-link와 down-link의 전력소모량을 나타내고 있다. 3개의 주파수 대역이 공통적으로 비콘 신호 주기가 증가함에 따라서 전력소모량이 점차 감소되면서 6~7 μ W로 수렴하는 특성을 보였다. 비콘 신호 주기가 0.1초일 때 868 MHz에서는 153.0 %, 915 MHz에서는 152.7 %, 2.4 GHz에서는 142.4 %로 up-link가 down-link보다 평균 149.4 % 전력을 많이 소모하였다.

전 주파수 대역에서 코디네이터에서 센서 노드로 제어 데이터를 전송과정이 많아 전송 시간이 증가하였지만, 전력소모 측면에서는 전송시간보다 데이터를 송신하는데 소요되는 전력소모에 민감하다는 것을 알 수 있었다. 비콘 신호 주기에 따라 2.4

GHz가 915 MHz 주파수 대역보다 up-link 5.3~509.3 %, down-link 2.1~484.5 % 정도 우수한 전력소모 특성을 보였다. 그리고 868 MHz 주파수 대역보다는 up-link 11.7~1,117.6 %, down-link 4.6~1,066.7 % 정도 우수한 성능을 나타냈다.

표 2. 전력소모량 분석에 사용된 파라미터

구분	868MHz	915MHz	2.4GHz	비고	
전력소모량	P_{Doze}	5 μ W			
	$P_{Receive}$	1.8 mW			
	P_{Send}	27 mW			
시간변이	θ	30 PPM			
시간간격	T_T	0.4 ms	0.2 ms	0.06 ms	
	T_S	0.8 ms	0.4 ms	0.12 ms	
	T_C	3.2 ms	1.6 ms	0.32 ms	10 byte
	T_A	3.5 ms	1.75 ms	0.35 ms	11 byte

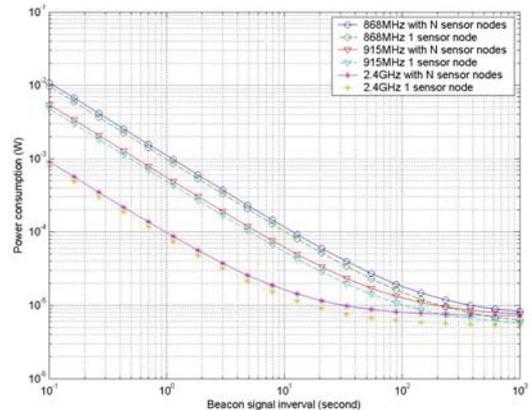


그림 4. 비콘 신호 주기에 따른 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 주파수 대역 전력소모량 (up, down data = 50 byte, N = 10)

그림 4는 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 주파수 대역에서 비콘 신호 주기에 따라 소모되는 센서 노드의 총 전력소모량을 표시하고 있다. 단일 센서 네트워크보다 센서 노드가 10개일 때 2.4 GHz는 평균 23.7%, 915 MHz는 18.7%, 868 MHz는 17.3% 증가하였다. 이는 센서 노드가 증가함에 따라서 불필요한 비콘 신호를 수신함에 따른 전력 소모 (overhearing)임을 알 수 있다. 전체적인 전력소모량에 있어서는 큰 영향을 주지는 못하였지만 센서 노드의 수가 증가함에 따라 비례적으로 전력소모량이 증가하므로 센서 노드의 수가 많을 때는 고려해야

할 요소이다. 비콘 신호 주기가 0.1초, 10초, 1000 초일 때 2.4 GHz 주파수 대역은 0.91 mW, 16.2 μ W, 7.2 μ W의 전력을 소비하였다. 동일 환경에서 915 MHz 주파수 대역 5.5 mW, 61.6 μ W, 7.7 μ W, 868 MHz 주파수 대역은 10.9 mW, 116.1 μ W, 8.2 μ W의 전력을 소비한 것으로 나타났다. 3 개의 주파수 대역을 비교한 결과 2.4 GHz 대역이 타 주파수 대역보다 최대 1,112.2~506.5 % 전력 소비량 측면에서 우수하였고, 단일 센서 노드보다 10개의 센서 노드로 구성된 네트워크에서 평균 19.9 % 전력을 많이 소비하였다.

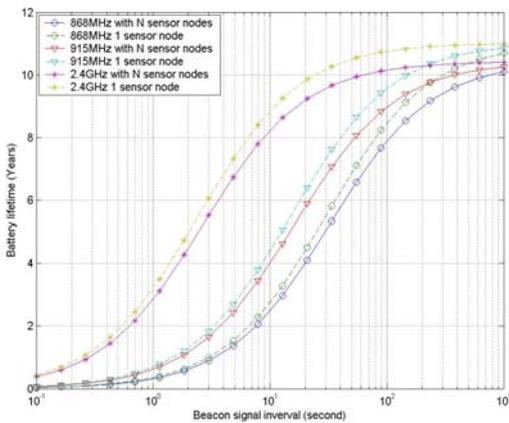


그림 5. 비콘 신호 주기에 따른 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 주파수 대역 배터리 사용시간 (up, down data = 50 byte, N = 10)

그림 5는 비콘 신호 주기에 따른 각 주파수 대역 별 센서 노드의 배터리 사용 시간을 나타낸다. 배터리 모델은 평균누설전력이 27 μ W이고, 배터리 용량이 2.6 Ah인 알카라인 배터리 1개를 고려하였다. 비콘 신호 주기가 0.1초일 때 센서 노드의 배터리 수명은 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 주파수 대역별로 각각 11.9일, 23.7일, 138.9일로 나타났다. 비콘 신호 주기가 100초일 때는 7.9년, 9.0년, 10.1년 동안 배터리를 사용할 수 있는 결과가 나왔다. 단일 센서 네트워크에서는 센서 노드가 10개일 때보다 868 MHz는 평균 108.2일, 915 MHz는 123.5일, 2.4 GHz는 169.3일 더 사용할 수 있었다. ZigBee 연합에서 목표로 하고 있는 2년 이상의 배터리 수명을 유지하기 위한 비콘 신호의 주기는 868 MHz는 7.7초, 915 MHz는 3.8초, 2.4 GHz는 0.65초로 나타나 2.4 GHz 주파수 대역이 동일한 배터리에서 데이터 전달 즉시성이 11.8~5.8배 우수하였다.

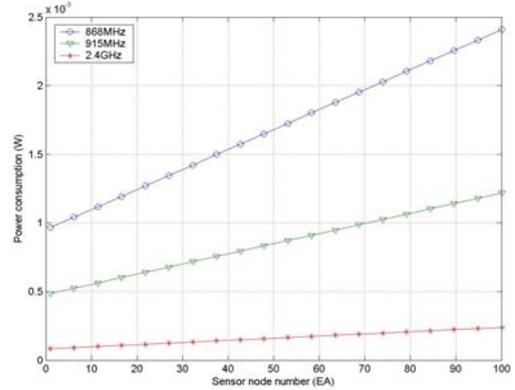


그림 6. 센서 노드 수에 따른 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 주파수 대역 전력소모량 ($T_W = 1$ 초, up, down data = 50 byte)

그림 6은 센서 노드 수가 증가함에 따라서 각 주파수 대역에서 전력소모량이 어떻게 변화하는지를 보여 주고 있다. 1개의 코디네이터에 센서 노드 수가 10개, 50개, 100개로 증가할 때 868 MHz는 1.1 mW, 1.7 mW, 2.4 mW 915 MHz는 0.55 mW, 0.84 mW, 1.2 mW 2.4 GHz는 97.3 μ W, 159.9 μ W, 238.2 μ W의 전력을 소모하는 것으로 나타났다. 센서 노드 수가 10개에서 100개로 증가할 때 전력 소모량이 868 MHz는 1.3 mW, 915 MHz는 0.65 mW, 2.4 GHz는 0.15 mW로 증가하였고, 증가 비율은 118.2~144.8 %로 나타났다. 주파수 대역별 특성에 있어서는 센서 노드 수 증가에 따라 2.4 GHz 주파수 대역이 915 MHz대역과 868 MHz 대역보다 최대 411.2~483.3 %, 911.2~1,060.3 % 우수하였다.

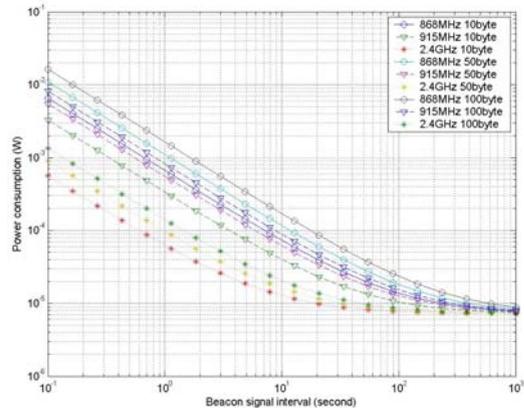


그림 7. 비콘 신호 주기 및 up-link 데이터 크기에 따른 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 주파수 대역 전력소모량 (down data = 50 byte, N = 10)

그림 7은 비콘 신호 주기 변화와 센서 노드에서 코디네이터로 송신하는 up-link 센싱 데이터의 크기 변화에 따른 전력소모량을 각 주파수 대역별로 나타내는 그림이다. 모든 주파수 대역에서 up-link 데이터의 크기가 증가함에 따라서 전력소모량이 증가함을 알 수 있었으며, 비콘 신호 주기가 1초, down-link 데이터는 50 byte로 고정된 값으로 up-link 데이터가 각각 10 byte, 50 byte, 100 byte로 변화할 경우 868 MHz는 0.66 mW, 1.1 mW, 1.6 mW로 각각 66.7 %, 142.4 % 증가하였다. 915 MHz는 0.34 mW, 0.55 mW, 0.82 mW로 61.8 %, 141.2 % 증가하였고, 2.4 GHz에서는 62.8 μ W, 97.3 μ W, 140.5 μ W로 54.9 %, 123.7 % 증가하였다. up-link 데이터 증가에 따른 주파수 특성에 있어서 2.4 GHz가 타 주파수 대역보다 약 11~12% 성능이 우수한 뿐 성능의 차이는 미미하였다.

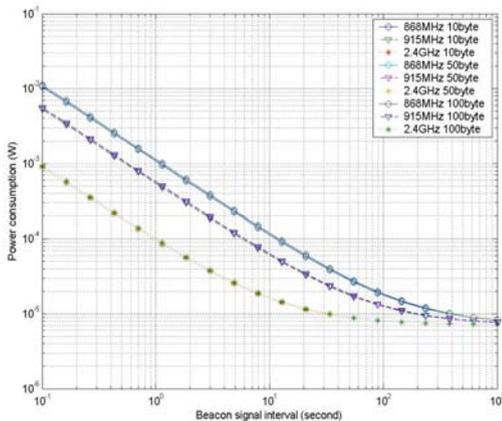


그림 8. 비콘 신호 주기 및 down-link 데이터 크기에 따른 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz 주파수 대역 전력소모량 (up data = 50 byte, N = 10)

그림 8은 코디네이터에서 센서 노드로 송신하는 down-link 제어 데이터의 크기에 따라서 비콘 신호 주기에 의한 센서 노드의 전력소모량을 나타내고 있다. 그림 7에서 보인 up-link와는 다르게 down-link 데이터 크기 변화에 거의 변화가 없는 전력소모량 그래프 형태를 나타내었다. 비콘 신호 주기가 1초, up-link 데이터는 50 byte이며, down-link 데이터가 각각 10 byte, 50 byte, 100 byte로 가변되는 경우를 고려하였다. 데이터 크기 변화에 따라 소모되는 전력은 868 MHz는 1.07 mW, 1.1 mW, 1.13 mW, 915 MHz는 0.54 mW, 0.55 mW, 0.57 mW, 2.4 GHz에서는 95.0 μ W, 97.3 μ W, 100.2 μ W로 2.3~6.5% 증가하였다. up-link 데이터 증가에 따른 주파

수 특성과 마찬가지로 down-link에 있어서도 2.4 GHz가 타 주파수 대역보다 약 24% 성능이 우수하였다. 하지만 down-link 데이터의 크기가 증가함에 따라서 센서 노드의 전력소모량이 최대 6.5% 정도 증가하는데 그쳐 전력소모량과 down-link 데이터의 크기와의 상관관계가 아주 미약함을 알 수 있었다.

V. 결론

IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜을 사용하는 비콘 모드 스타 센서 네트워크에서 각각의 센서 노드에서 소모되는 전력을 분석 파라미터별 연관성과 전력소모에 미치는 영향을 분석하였다. 성능분석을 위하여 데이터 전송과정에 소요되는 시간과 평균적인 송수신 전력량으로 센서 노드 전력소모량을 수식으로 전개하였으며, CSEM에서 제작한 WiseNET 시스템 측정값을 활용하였다.

모의실험 결과, 단일 센서 네트워크보다 10개의 스타 센서 네트워크에서 평균 19.9% 전력소모량이 증가했고, 비콘 신호 주기가 0.1초일 때 3개의 주파수 대역 모두 up-link가 down-link보다 평균 149.4% 많은 전력을 소비하였다. 비콘 신호 주기가 1초일 때 센서 노드의 센싱 데이터의 크기가 10byte에서 100byte로 증가할 경우 전력소모량이 123.7~142.4% 증가하였으며 센서 노드의 수가 10개에서 100개로 증가될 경우에는 전력소모량이 118.2~144.8%로 증가하였다. 그러나 코디네이터에서 센서 노드로 송신하는 제어 데이터 패킷의 크기가 10byte에서 100byte까지 증가하더라도 소모되는 전력은 2.3~6.5%로 아주 미세하게 증가할 뿐 큰 차이가 없었다. 센서 노드에서 발생하는 전력 소비는 대부분 up-link에서 발생하며, 저주파수 대역일수록 전력소모가 증가함을 알 수 있었다. 비콘 신호 주기 증가에 따라서 각 주파수 대역별로 전력소모량이 감소하다가 100초 이후부터는 일정한 값으로 수렴하는 특성이 나타났다. 주파수 대역별 특성은 비콘 신호 주기에 따라서 2.4GHz 대역 주파수가 타 주파수 대역 보다 최대 506.6~1,112.2% 우수한 특성을 보였다. 센서 노드 수 증가에 따라서는 최대 483.1~1,060.3%, 제어 데이터 크기에 따라서는 약 24% 성능이 우수하였고, 센싱 데이터 크기에 따라서는 약 11~12% 성능이 우수하였다. 결론적으로 비콘 신호 주기, 센서 노드의 수, 센싱 데이터의 크기와 센서 노드의 전력 소모량은 상호 연관성이 많았으나 제어 데이터 크기와는 미미하였다.

참 고 문 헌

[1] 장석철, "ZigBee Application과 증기 시장전망," 전자부품연구원 전자정보센터 www.eic.re.kr, 2004.

[2] 전호인, 신용섭, "유비쿼터스 네트워킹 시대를 위한 차세대 네트워크 기반 기술 및 무선 홈 네트워킹 기술," 한국통신학회지, 제20권, 제5호, pp. 156-173, 2003.

[3] T. Lin, W. J. Kaise, and G. J. Pottie, "Integrated low-power communication system design for wireless sensor networks," IEEE Communications Magazine, pp. 142-150, Dec. 2004.

[4] IEEE Std. 802.15.4, 2003.

[5] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," IEEE INFOCOM Conf. pp. 1567-1576, 2002.

[6] A. El-Hoiydi and J. -D. Decotignie, "WiseMAC : An ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks," IEEE symposium on computers and communication ISCC'04, pp. 244-251, June 2004.

[7] S. Rhee, D. Seetharam, and S. Liu, "Techniques for minimizing power consumption in low data-rate wireless sensor networks," IEEE Communications Society WCNC 2004, pp. 1727-1731, 2004.

[8] A. El-Hoiydi, "Spatial TDMA and CSMA with preamble sampling for low power ad hoc wireless sensor networks," In Proc. IEEE Int. Conf. on Computers and Communications (ISCC), pp. 685-692, July 2002.

[9] ZigBee Alliance Web Site : www.zigbee.org

[10] Ed. Callaway, Jose A. Gutierrez, Bob Heile, and Venkat Bahl, "Home networking with IEEE 802.15.4: A developing standard for low-rate wireless personal area networks," IEEE Communications Magazine, pp.70-77, Aug. 2002.

[11] C. C. Enz, A. El-Hoiydi, J. -D Decotignie, and V. Peiris, "WiseNET : An ultra low-power wireless sensor network solution," IEEE Computer Society, pp. 62-70, Aug. 2004.

[12] A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, and J. Heernandez, "Low power MAC protocols for infrastructure wireless sensor networks," In Proc. European Wireless(EW'04), pp. 563-569, Feb. 2004.

유 영 대 (Young-dae Yoo)

준회원



1995년 2월 충북대학교 전기공학과 졸업
 2006년 2월 충북대학교 정보통신공학과 석사
 1997년 7월~현재 KT
 <관심분야> Bluetooth, Zigbee, W-CDMA

최 정 훈 (Jung-hun Choi)

준회원



2000년 2월 대전대학교 정보시스템공학과 졸업
 2004년 8월 충북대학교 정보통신공학과 석사
 2005년 3월~현재 충북대학교 정보통신공학과 박사과정
 <관심분야> UWB, OFDM, MIMO, Wibro, Zigbee

김 남 (Nam Kim)

종신회원



1981년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업
 1983년 2월 연세대학교 전자공학과 석사
 1988년 8월 연세대학교 전자공학과 박사
 1989년 2월~현재 충북대학교

전기전자컴퓨터공학부 교수

1999년 3월~현재 컴퓨터 정보통신연구소 연구원

2005년 4월~현재 충북 BIT 연구중심대학 육성사업단 사업단장

2005년 10월~현재 : 정보통신부 전과정책위원회 위원

<관심분야> 디지털이동통신, 이동통신, 무선시스템, 전자파해석, EMI/EMC, Diffractive Optics, WDM Optical Filter & DEMUX Optical Memory, Holography Application