

무선 센서 네트워크에서 다중 채널과 전송세기 제어를 이용한 맥 프로토콜

정희원 윤장묵*, 종신회원 박세웅**

SPMC-MAC : Slim Preamble Multi-Channel MAC Protocol with Transmission Power Control in Wireless Sensor Networks

Jang-Muk Yoon* *Regular Member*, Saewoong Bahk** *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 다중 채널 환경의 무선 센서 네트워크에서 에너지 소모를 최소화하고 데이터 수율(Throughput)을 증대시키기 위한 비동기 방식의 맥 프로토콜을 제안한다. 제안하는 맥 프로토콜인 SPMC-MAC(Slim Preamble Multi Channel Media Access Control)은 [6]에서 제안했던 수신 노드가 깨어날 시간 정보의 이점을 이용하여 프리앰블의 길이를 줄이는 매커니즘을 채택한다. 프리앰블은 수신 노드의 ID와 랜덤하게 선택된 채널을 포함하여 전용의 기본 채널을 통해서 전송된다. 전송 세기 제어는 통신 가능 범위내에서 적정 노드 수를 유지함으로써 데이터 전송시 충돌과 간섭을 줄일 수 있다. 수학적 분석과 모의실험을 통해 에너지 소모와 수율에 대해 제안하는 SPMC-MAC과 X-MAC을 비교한다.

Key Words : MAC protocol, Multi-channel, Transmission power control, Wireless sensor network

ABSTRACT

In this paper, we propose an asynchronous MAC protocol to minimize energy usage and to maximize data throughput for a wireless sensor network in multi channel environments. Our proposed SPMC-MAC (Slim Preamble Multi-Channel Media Access Control) adopts the preamble sliming mechanism proposed in [6] that takes advantage of the knowledge about the wakeup time of the receiver node. The preamble contains the receiver's ID and a randomly selected channel ID for data communication, and it is transmitted over a dedicated common channel. The power control has the benefit of keeping an appropriate number of nodes with the communication range, resulting in reduced collision and interference. We compare our SPMC-MAC and X-MAC extensively in terms of energy consumption and throughput using mathematical analysis and simulation.

I. 서 론

최근 들어 ‘유비쿼터스(Ubiquitous)’가 화두로 등장하면서 우리 주변의 물리적 현상을 센서 장치에 의해 감지한 후 네트워크를 이용하여 대상 사물의

존재 여부 및 특정 현상과 주변의 환경 정보(온도, 습도, 오염 정도, 균열 정보)등을 확인하여 실시간으로 관리 제어하는 분야가 연구되고 있다. 즉 직접적인 접근이 어려운 전쟁터에서의 적국의 감시, 강수량, 지질 상태 등을 모니터링 하는 시스템, 교통 감

※ This work was supported in part by the ITRC program of Korea Ministry of Knowledge Economy and Seoul R&BD Program.

* 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사 (jmyoon@netlab.snu.ac.kr)

** 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수 (sbahk@netlab.snu.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-06-290, 접수일자 : 2008년 6월 28일, 최종논문접수일자 : 2008년 9월 9일

시와 제어를 위한 지능형 교통 통제 시스템 등의 응용분야에서 무선 센서 네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)를 이용하여 새로운 미래의 유비쿼터스 환경을 구축하려는 시도가 진행되고 있다^{[1][2]}.

무선 센서 네트워크는 기존의 무선 네트워크(Wireless Network)와 다른 특성들을 가지고 있다. 센서 네트워크를 구성하는 노드는 초소형으로 제작되어야하기 때문에 크기와 비용 측면에서 제약이 많으며, 배터리 기반으로 동작되므로 한정된 에너지를 사용한다. 또한 제한된 연산 처리 능력을 가지며, 기존의 셀룰라 통신망과는 달리 특정 인프라 구조가 없이 에드혹(Ad-hoc)형태로 구성된다.

이와 같은 동작 메커니즘은 라우팅(Routing)이나 맥(MAC: Media Access Control)과 같은 다양한 프로토콜 연구에 대한 필요성을 증대시켰다. 그 중에 에너지의 소모를 최소화하는 효율적인 방안에 대한 맥 프로토콜의 연구는 무선 센서 네트워크 관련 연구의 핵심 주제이며, S-MAC^[3], B-MAC^[4], Wise-MAC^[5], X-MAC^[6], SCP-MAC^[7] 과 같은 많은 종류의 맥 프로토콜들이 연구되었다.

지금까지 연구가 진행된 맥 프로토콜들은 인접한 이웃노드들과 동기를 맞추는지의 여부에 따라 동기식과 비동기식으로 나눌 수 있다. 무선 센서 네트워크에서는 비용적인 제약으로 인해 저가의 크리스탈 오실레이터(Crystal Oscillator)를 사용한다^[8]. 따라서 클럭 오차(Clock Drift)는 기존의 무선 네트워크와 비교해서 상대적으로 크게 발생한다. 네트워크상에 있는 센서 노드들은 동일한 시간정보를 갖기 위해 주기적으로 컨트롤 패킷을 보내서 동기화한다. 그러나 무선 센서 네트워크에서의 동기화는 네트워크상에 있는 모든 노드들과 동시에 이루어지는 동기화가 아니라 인접한 가까운 이웃노드들과의 동기화만을 의미하고, 이를 통해 전체 네트워크의 동기화에 근접할 수 있다고 본다. 대표적으로 S-MAC^[3], SCP-MAC^[7] 등이 이에 속한다. 비동기 방식의 맥 프로토콜은 동기화를 위해 주기적으로 사용하는 컨트롤 패킷이 에너지 소모를 증가시킨다고 보고 이를 배제한 방식을 의미한다. 대표적으로 B-MAC^[4], Wise-MAC^[5], X-MAC^[6] 등이 이에 속한다.

전체 사용되는 에너지 중에 가장 많은 비중을 차지하는 것이 통신 부분이다. 에너지 소모를 최소화하려는 노력으로 노드는 주기적으로 동작하고 동작하지 않는 시점에서는 센서의 통신 모듈을 끈다. 또한 센서 노드는 감시하는 주변 환경에서 관심 있는

특정 이벤트가 발생하였을 때 데이터 패킷의 전송량이 급격하게 증가한다. 또한 일반적인 상황에서는 소량의 데이터 패킷을 주기적으로 전송하는 것을 알 수 있다.

무선 센서 네트워크에서의 최우선 고려요소인 에너지 소모의 최소화와 발생하는 데이터 패킷의 주기적/비주기적 특성을 고려하고 다중 채널과 전송세기 제어를 이용하는 맥 프로토콜을 제안한다. 비동기 방식으로 짧은 프리앰블(Short Preamble)을 사용하는 X-MAC의 기본 동작 메커니즘을 이용하고 초기화 과정을 통해 이웃노드의 위치정보를 획득하여 이웃노드 정보 테이블을 만들고 이를 통해 송신 노드는 데이터의 전송 세기를 제어한다. 또한 획득한 정보와 IEEE 802.15.4 표준^[9]에서 정의한 다중 채널(Multi-Channel)을 이용하여 통신함으로써 에너지 소모를 줄이고 데이터의 전송률을 증대시킬 수 있다.

본 논문에서는 에너지 소모를 더욱 줄이기 위해 짧은 프리앰블(Short Preamble)을 슬림하게 만드는 과정을 기술하고, 데이터의 수율을 증대시키기 위한 다중 채널 스위칭에 대해서 설명하고, 그리고 데이터의 전송 세기를 제어하는 방법에 대해 기술한다. 다음으로 수학적 분석을 통해 기존 맥 프로토콜과 제안하는 맥 프로토콜 간에 에너지 소모를 분석하고, 모의 실험 환경을 조성하여 에너지 소모와 수율을 비교, 분석한다. 마지막으로 본 논문에서 제안한 맥 프로토콜의 장단점을 정리하면서 글을 맺는다.

II. SPMC-MAC 설계

2.1 프리앰블 길이 슬림화

비동기 방식의 맥 프로토콜인 X-MAC은 그림 1에서와 같이 송신 노드가 데이터를 보내려고 하는 시점부터 짧은 프리앰블(Short Preamble)을 보내기 시작한다. 그리고 수신 노드는 이 짧은 프리앰블을 듣고나서 대상 노드가 자기 자신인지를 확인한 후 맞으면 early ACK을 보낸다. 이를 수신한 송신 노드는 데이터를 송신하기 시작하고 동시에 수신할 준비를 하고 기다리던 수신 노드는 데이터를 수신한다. 기존에 연구된 비동기 방식의 맥 프로토콜들은 프리앰블 샘플링 기법(Low Power Listening : LPL)을 사용하여 한주기(T) 동안 프리앰블을 전송하는데 반해서, X-MAC에서는 프리앰블을 작은 단위로 나눈 후 대상노드의 정보를 실어서 보내는 방식이어서 프리앰블의 길이가 작아진다. 하지만 데이

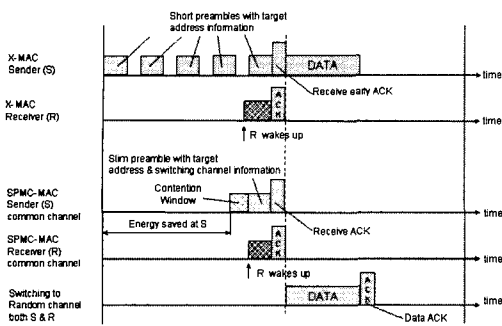


그림 1. SPMC-MAC(제안하는 맥)과 X-MAC 비교

터 수신해야 할 대상 노드가 언제 깨어날지 모르기 때문에 최악의 경우 전체 한 주기(T) 동안 짧은 프리앰블을 계속해서 보내야 하는 경우가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제안하는 SPMC-MAC에서는 노드 초기화 과정을 통해서 획득한 이웃노드의 ID 정보와 노드가 깨어나서 수신할 데이터가 있는지를 확인하는 액티브 모드(Active Mode)의 시작 시간인 시작 시간 정보(Start Time Information)를 이용하여 수신 노드가 깨어날 시점에 맞춰서 송신 노드가 깨어나서 프리앰블을 보낸다. 이를 통해 송신 노드는 길이가 더욱 슬림화된 짧은 프리앰블(Short Preamble)을 보낸 후 데이터 전송이 이루어지게 된다. 짧은 프리앰블의 길이를 더욱 슬림하게 함으로써 X-MAC과 비교하여 에너지 소모를 더욱 줄일 수 있는 것이다. 그리고 노드 초기화 과정을 통해 만들어진 시작 시간 정보는 통신이 이루어질 때마다 수신 노드로부터 받은 early ACK 시간을 체크하여 노드의 최근 깨어난 시간을 계산하고 갱신한다. 노드간에 통신이 이루어질 때마다 이웃 노드 정보 테이블의 시작 시간 정보를 갱신함으로써 최신의 시간 정보를 유지하게 된다. 갱신되는 시간정보로 인해 어느 정도 정확한 전송이 가능하나 성능이 떨어지는 저가의 CMOS 크리스탈 오실리에이터(Crystal Oscillator)를 사용하기 때문에 각 노드 간에 클럭 오차가 발생한다. 일반적으로 무선 센서 네트워크에서는 30ppm(백만 번 당 30번 클럭 오차)의 클럭 오차가 발생하므로 송신 노드가 특정 대상 노드의 깨어난 시간을 정확히 알고 있고 또한 자고 깨어나는 주기를 알고 있다고 해도 노드가 언제 깨어날지 예측한 시간은 편차가 발생할 수밖에 없다. 결국 이 편차를 극복하기 위해서 송신 노드는 데이터를 전송하기 전에 먼저 전송하는 짧은 프리앰블(Short Preamble)의 길이를 조정해야 한다. 프리앰블의 길이는 송·수신 노드간에 마지막으

로 통신이 이루어지면서 갱신한 시작 시간 정보와 다시 데이터를 보내려고 하는 현 시점과의 경과된 시간을 고려하여 조정된다. 다시 말해서 시간 경과로 인해 발생된 클럭 오차(Clock Drift)를 계산해서 프리앰블의 길이를 조정하는 것이다. 주기적/비주기적인 데이터의 전송으로 인해 수신 노드에 대한 최근의 시작 시간(Start Time)과 경과된 시간의 차는 크지 않다고 할 수 있다. 따라서 프리앰블의 길이는 X-MAC과 비교하여 더욱 슬림해질 수 있는 것이다. 제안하는 SPMC-MAC에서의 짧은 프리앰블 길이는 다음과 같이 정의 된다.

$$D_{diff} = 4 * R_{cd} * T_{diff}$$

$$S_{diff} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{D_{diff}}{S_{pal}} \right\rfloor * S_{pal} & \text{When, } D_{diff} \leq T, (x) = n, (n-1 \leq x < n) \\ \text{select earliest other node (having } D_{diff} \leq T), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

R_{cd} 는 클럭 오차를, T_{diff} 는 송신 노드가 수신노드에게 데이터를 보내려고 하는 시점의 시간과 수신 노드가 마지막으로 깨어났던 정보인 시작 시간(Start Time)과의 차, D_{diff} 는 짧은 프리앰블의 최대 길이, S_{diff} 는 이웃 노드의 시작 시간 정보와 데이터를 보내려고 하는 시점 사이의 시간 경과로 인해 발생하는 클럭 오차를 고려하여 계산한 짧은 프리앰블의 전송 횟수를 나타내고, S_{pal} 는 짧은 프리앰블과 early ACK의 합이고, T는 한 주기(Duty Cycle)를 의미한다. 시간경과를 의미하는 T_{diff} 의 값에 따라서 짧은 프리앰블의 길이는 조정되고, 계산한 프리앰블의 길이가 T보다 작은 경우 더욱 슬림화된 짧은 프리앰블을 보내고, T보다 큰 경우 이웃노드 정보 테이블에서 다른 수신 노드로 변경한다. 싱크 노드(Sink Node)로 향하는 다음 홉(Next Hop)에 속하는 수신 노드 중에서 깨어날 주기가 가장 빠른 노드를 선택한다. 프리앰블의 길이를 계산한 후 송신노드는 슬림화된 짧은 프리앰블을 전송한다. 여기에서, 클럭 오차를 고려하여 프리앰블의 길이가 짧은 노드를 선택하여 전송하려 할 경우에 라우팅 경로가 변경될 것이다. 라우팅 정보를 변경하기 위해 이웃노드 정보 테이블에 있는 이웃 노드 정보를 이용하여 라우팅 경로를 결정하도록 기존 알고리즘을 수정하거나 새로운 알고리즘을 제안해야 한다. 따라서 라우팅 알고리즘의 제안은 본 논문의 연구 범위를 벗어나므로 차후 연구로 남겨놓도록 한다.

2.2 채널 스위칭

특정 이벤트 감지 후 전송해야할 데이터가 급격하게 증가하게 될 경우 단일 채널환경보다 다중 채널

널환경이 더욱 효과적인 대처가 가능하다. 관심 지역에 배치되어 있는 많은 노드들이 감지한 데이터를 동시에 하나의 채널을 이용하여 전송하려하면 데이터간에 충돌이 발생하고 추가적인 데이터 전송 시도로 인해 에너지 소모가 증가하게 된다.

무선 센서 네트워크의 표준인 802.15.4 standard^[9]에서는 물리계층과 데이터링크 계층에 대한 세부적인 정의가 되어 있는데, 특히 물리계층의 정의에서는 여러 라디오 밴드에서 많은 수의 채널을 사용할 수 있도록 되어 있다. 무선 라디오 밴드는 868/915MHz, 2.4GHz 대역이 사용 가능하고 전체 27개의 채널을 사용할 수 있다(868MHz-1 채널, 915MHz-10 채널, 2.4GHz-16 채널).

무선 센서 네트워크의 연구와 실험을 위해 많은 종류의 센서 노드인 모트(Mote)들이 출시되었고, Mica2^[10], Micaz^[11], Telosb^[12] 등의 모트에서는 CC1000^[13], CC2420^[14]과 같은 라디오 모듈을 통해 통신이 이루어진다. 여기에서는 Telosb에서 사용하는 ISM band인 2.4GHz 대역의 라디오 모듈 CC2420을 기반으로 총 16개의 채널을 사용할 수 있는 환경을 고려한다.

기존에 제안된 많은 수의 맥 프로토콜들은 단일 채널 환경에서 동작되도록 설계가 되어있기 때문에 다중 채널 환경을 적용하기에는 제약사항이 많다. 즉, 액티브 모드와 슬립 모드가 주기적으로 동작하는 비동기식 맥 프로토콜에서는 다중 채널을 이용하려면 프로토콜 설계의 변경이 필요하다.

ISM band의 채널상태는 주변 환경의 변화로 인해 영향을 받을 뿐만 아니라 다양한 요인에 의해 채널 환경이 변하게 된다. 따라서 이용하고자 하는 채널이 통신 가능 상태인지를 확인해야 한다. 그러나 통신이 이루어질 채널의 상태를 미리 확인하고 체크하여 이를 바탕으로 실제 통신을 하기에는 그 비용적인 측면이 너무 커진다. 따라서 다음과 같은 사항을 가정한다. 센서 네트워크에서는 2.4GHz 대역에서 이용할 수 있는 전체 채널의 수가 16로 많이 있고 랜덤하게 채널을 선택할 경우 특정 노드에 의해 사용되고 있지 않을 수 있다고 본다. 그리고 기존의 에드 혹에서 연구된 다중채널을 사용한 맥 프로토콜과 다르게 동기식 방식이 아니라 비동기식 방식을 고려한다. 하드웨어 비용을 최소화 하기위해서 통신 인터페이스는 하나가 있는 것으로 한다. 따라서 하나의 노드가 통신을 하는데 있어서 여러 개의 채널을 같은 시점에 이용할 수는 없다^[15].

이러한 가정을 바탕으로 그림 1에서와 같이 제안

하는 SPMC-MAC의 동작 과정을 보면 먼저 특정 이벤트를 감지하여 데이터를 보내려고 하는 송신 노드는 데이터를 보내기 전에 수신 노드가 깨어날 시점에 맞추어서 미리 깨어난 후 지정된 기본 채널을 통해서 짧은 프리앰블을 보내게 된다. 이 프리앰블의 길이는 식 (1)에 의해서 계산된 것이다. 송신 노드는 대상 수신 노드가 깨어날 시점과 프리앰블의 길이를 고려하여 그전에 깨어나서 프리앰블을 보내기 시작한다. 이 짧은 프리앰블 내에는 대상 노드의 ID 정보와 데이터 전송을 위해 함께 이동하려는 16개의 채널 중에 랜덤하게 선택한 채널에 대한 정보가 담겨있다. 이 프리앰블을 받은 수신 노드는 자기의 ID와 프리앰블에 포함된 노드의 ID 정보가 같은지 확인하고, 그와 동시에 데이터를 송·수신할 랜덤 채널을 확인한다. 대상 노드가 맞으면 수신 노드는 바로 송신 노드에게 early ACK을 보낸다. 대상 노드가 아닌 다른 노드들은 다시 슬립 모드로 들어가게 된다. 수신 노드는 프리앰블에서 확인한 랜덤 채널로 이동하여 데이터를 수신할 준비를 하고 대기한다. early ACK을 받은 송신 노드는 프리앰블에 실어 보냈던 채널로 이동하여 데이터를 보내고 최종적으로 대상 수신 노드로부터 data ACK을 수신 후 다시 슬립 모드로 들어가게 된다. 여기에서는 전체 16개의 채널 중에 하나의 채널을 기본 채널로 하여 프리앰블과 early ACK을 송·수신하기 위해 사용하고, 나머지 15개의 채널은 데이터와 data ACK을 송·수신하기 위해 사용된다. 통신 가능 범위(Communication Range)내에 서로 다른 송신 노드와 수신 노드간에 통신이 이루어질 경우 단일 채널 환경에서는 어느 노드간 송·수신이 이루어질 때 다른 노드들은 전송이 끝날때까지 기다려야하지만, 다중 채널 환경에서는 기본 채널에서 짧은 프리앰블이 전송되고, 전송이 성공적으로 이루어진 경우 상대적으로 크기가 큰 데이터는 랜덤하게 선택된 다른 채널에서 송·수신이 이루어진다. 따라서 데이터를 보내고자하는 다른 노드들이 다시 기본 채널을 사용하여 프리앰블을 보내는 절차를 수행할 수 있고, 그에 따라서 전송률이 향상된다.

2.3 전송 세기 제어

무선 센서 네트워크에서 데이터를 전송하기 위해 사용하는 파워의 세기는 최대로 고정되어 있고 모든 노드는 전송 시 최대 전송 세기를 사용하여 데이터를 보낸다. 에너지 소모를 최소화하여 네트워크의 수명을 연장해야하므로 고정된 최대 전송 세기

의 사용은 개선되어야 한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 센서 노드들은 통신이 이루어지는 노드들 사이의 거리 정보를 바탕으로 전송 세기를 제어하고 이를 통해 에너지 소모를 줄일 수 있다. 또한 노드들의 배치가 조밀(Dense)할 경우 다중채널의 사용을 통해 노드들 간의 불필요한 간섭을 배제할 수 있다⁸⁾.

Telosb¹²⁾ 센서 노드에서 사용하는 CC2420¹⁴⁾ 통신 모듈에서는 데이터를 전송하기 위한 송신 파워의 세기를 여러 단계로 나눠서 보낼 수가 있다. 그리고 RSSI(Received Signal Strength Indicator)를 이용하여 송신 노드가 보낸 데이터의 신호 세기를 수신노드가 수신하여 이를 바탕으로 수신 가능한 데이터인지의 여부나 캐리어센스(Carrier Sense)를 수행하는 기준으로 사용한다.

최초 이웃노드의 정보를 획득하는 노드 초기화 과정에서 각각의 노드에 대한 거리를 계산할 수 있다. 이 거리 정보를 바탕으로 그림 2에서와 같이 5단계의 전송 파워 세기를 구분하여 나누고 분류를 한다. 분류된 정보는 이웃 노드 정보 테이블에 노드별로 추가 정보로 저장하고, 데이터를 송신하려는 노드는 이웃 노드 정보 테이블에서 대상 노드에 해당하는 최소의 전송 파워 세기를 확인하여 전송한다¹⁶⁾.

전송 파워의 단계가 결정되어 적용되는 절차를 보면 먼저 송신 노드는 자기의 최대 파워를 이용하여 이웃노드들에게 데이터를 보내기 위하여 사전에 짧은 프리앰블을 보내게 된다. 이 프리앰블을 받은 대상 노드는 RSSI를 통해 파워 세기를 측정하여 가장 최적의 파워 세기로 보낼 수 있는 단계를 결정하여 early ACK을 보낸다. 여기에서의 전송 파워 단계의 결정은 이웃 노드 테이블에 데이터 송·수신이 이루어질 때마다 업데이트된 해당 노드 ID와 의 통신 가능 파워 세기 단계와 새롭게 측정된 파워 세기 단계를 비교하여 큰 단계를 선택한다. 이유는 채널 환경이 수시로 변한다고 보고 더 안 좋은 채널 상황을 고려하려는 것이다. early ACK을 받은 송신 노드도 RSSI를 이용하여 수신 파워를 측정한다

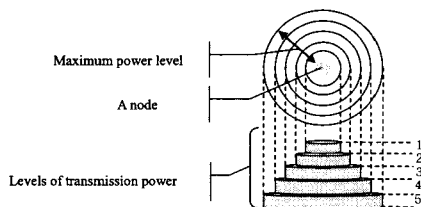


그림 2. 전송 세기 레벨

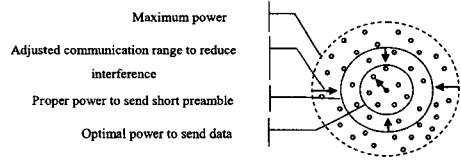


그림 3. 전송 세기 제어의 예

후 최적의 전송 파워를 이용하여 데이터를 보내게 된다. 마지막으로 수신 노드에서는 데이터의 ACK도 전송 파워 제어를 해서 보내게 된다. 전송 파워 세기의 조절을 통해 더욱더 에너지 소모를 줄일 수 있게 되는 것이다.

대부분 특정 지역에 노드를 배치시킬 때 위치를 지정하여 배치시키지 않기 때문에 노드들의 밀집도(Density)는 다양할 것이다. 따라서 인접한 이웃 노드들의 배치를 기준으로 분류하면 크게 I. 조밀하거나, II. 적당하거나, 혹은 III. 듥성듬성할 것이다. II, III에 해당하는 노드 배치의 경우 크게 문제가 되지 않는다. 그러나 I의 경우와 같이 노드가 조밀하게 배치되어 있을 경우에는 인접한 노드간에 데이터 전송 시 간섭이 증가하게 된다. 따라서 이를 해결하기 위해 그림 3에서와 같이 이웃노드의 수를 고려하여 적정 이웃노드가 되도록 프리앰블의 전송 파워 세기를 조절하는 것이다. 만약 자신의 이웃노드가 50개가 있을 경우 적정 이웃노드가 20개라면 데이터를 전송하기 전에 보내는 짧은 프리앰블을 보낼 때 최대파워를 사용하여 보내는 것이 아니라 20개의 이웃노드들만 들을 수 있는 파워 세기로 보내는 것이다. 이를 통해 노드의 배치가 조밀할 경우 데이터 전송으로 인한 상호 간섭을 줄일 수 있다.

III. 에너지 소모 분석

제안하는 SPMC-MAC의 에너지 소모를 수학적 분석을 통해 대상이 되는 X-MAC과 비교 분석하여 이론적인 에너지 소모의 감소량을 계산한다. 여기에서는 데이터 한 패킷을 전송하기 위해 필요한 에너지 소모를 비교 분석한다.

매체 사용 경쟁(Contention)은 기존의 X-MAC과 동일한 조건으로 본 분석에서는 동일한 캐리어 센싱(Carrier Sensing) 시간을 할당한다.

센서 네트워크의 노드는 시간당 전력 소모를 줄이고 수명을 늘리기 위해 일정 시간의 주기(Cycle)를 가지고 짧은 시간동안만 액티브 모드(Active

표 1. 사용된 변수값

Item	Value
P_{tx}	57.6 mW
P_{rx}	74.4 mW
P_s	0.00183 mW
S_p, S_{al}, R_l, R_a	0.26 ms
S_d	50 byte
R_d	30 ~ 50 byte
D_{cs}	0.13 ms
S_{pal}	0.52 ms (S_p+S_{al})
R_{cd}	30 ppm
T	16 ms (dyte cycle:10%)
Data Rate	250 Kbps

Mode)로 동작하고 대부분의 시간은 최소한의 필요한 전력만을 소비하는 슬립 모드(Sleep Mode)로 동작한다.

데이터 패킷 하나를 보내기 위해서 소모되는 예상 에너지는 송신과 수신으로 나누어 생각할 수 있다. 먼저 송신 시 소모되는 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 사용되는 변수값은 표 1과 같다.

$E_s = (\text{carrier sense energy}) + (\text{preamble power} * \text{level of power control} + \text{power for ACK listen}) * (\text{expected preamble-listen iteration according to time of clock drift}) + (\text{energy to send packet using multi channel} * \text{level of power control})$

$$E_s = P_{rx} * D_{cs} + (P_{tx} * L_{pc} + P_{rx}) * S_{tpal} + P_{tx} * L_{pc} * S_d \quad (2)$$

송신과 수신시 소모되는 전력은 각각 P_{tx} 와 P_{rx} 이고, D_{cs} 는 데이터 전송이 가능하지 확인하는 캐리어 센싱(Carrier Sensing) 시간이고, S_{tpal} 은 클럭 오차를 고려한 프리앰블의 최대 길이의 시간이며, L_{pc} 는 단계별 파워 세기의 비율을 의미하고, S_d 는 데이터의 전송 시간이다. 다음으로 수신 시 소모되는 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$E_r = (\text{listen energy}) + (\text{energy to send a early ACK} * \text{level of power control}) + (\text{energy to receive packet using multi channel}) + (\text{energy to send a data ACK} * \text{level of power control})$

$$E_r = P_{rx} * R_l + P_{tx} * L_{pc} * R_a + P_{rx} * R_l + P_{tx} * L_{pc} * R_a \quad (3)$$

짧은 프리앰블을 수신하기 위한 시간은 R_l 이고, 수신 노드가 ACK을 보내는 시간은 R_a 이다. 앞의 수식들을 이용하여 비교 대상인 X-MAC과 제안하는 SPMC-MAC의 데이터 패킷 하나를 송·수신할 때 소모되는 에너지를 계산하였다.

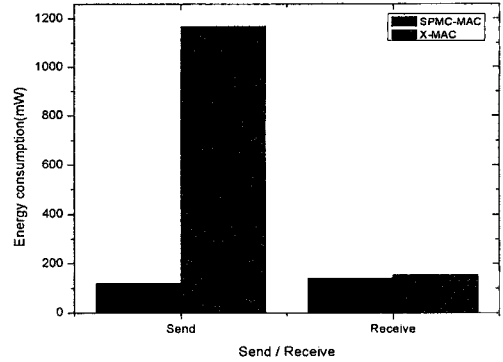


그림 4. 에너지 소모량 비교(SPMC-MAC/X-MAC)

SPMC-MAC에서 전송 파워의 세기는 배치된 노드가 균일할 경우 평균적으로 절반정도($P_{rx}/2$)의 에너지 감소가 있을 것으로 가정하였다.

X-MAC에서는 송신 노드가 데이터를 보내려고 할 경우 수신 노드의 깨어날 시점을 모르기 때문에 한 주기(T) 동안 짧은 프리앰블을 보내게 되는데 평균적으로 절반정도(T/2)의 시간이 경과하여 수신 노드가 깨어난다고 가정하였다.

그림 4는 SPMC-MAC과 X-MAC에서 각각 데이터 패킷 하나를 송·수신 할 경우에 소모되는 에너지를 나타낸다. 수신시에는 에너지 소모 차이가 거의 없으나 송신시에는 약 11배 정도의 차이가 난다. 그 이유는 짧은 프리앰블의 길이를 최소화하고 전송세기 제어를 함으로써 상대적으로 평균 T/2의 길이만큼 프리앰블을 보내야하고 전송세기 제어 기능이 없는 X-MAC에 비해서 에너지 소모가 줄어들기 때문이다.

IV. 모의 실험

4.1 실험 환경

제안하는 맥 프로토콜의 성능과 기존 맥 프로토콜의 성능을 비교하기 위해서 NS-2 Simulation Tool을 이용하여 실험환경을 구성하였다^[17]. 모의 실험을 위한 일반적인 시스템 매개 변수값들은 아래 표 2와 같다.

시뮬레이션에서는 크게 단일 홉(Single Hop)에서의 에너지 소모량과 다중 홉(Multi Hop)에서의 데이터 수율(Throughput)로 이 두 가지를 중점적으로 실험하기 위해 구성하였다. 첫 번째로 데이터를 발생시키는 노드 수를 증가 시키면서 그에 따른 평균 에너지 소모량을 측정하였다. 또한 노드의 수를 고정한 상태에서 메시지의 생성 간격을 증가 시키면

표 2. 시뮬레이션 파라미터

Components	Setting
Simulator	NS-2 simulator V 2.31
Topology	Star/Grid topology(800x800) Square
Node Number	2 ~ 10, 200(20x10)
Node Placement	Uniform
Data Size	50 and 300 byte
Routing Layer	AODV
MAC Layer	SPMC-MAC / X-MAC
Radio Layer	IEEE 802.15.4 24GHz (channel 16)
Radio Bandwidth	250 Kbps
Energy Usage	Receive:23mA, Transmit:17.5mA Idle:21uA, Sleep:1uA
Power Levels	1 ~ 5 (steps)
Distance of levels	10, 20, 30, 40, 50 (m)
Duty Cycle	10, 1, 0,1 (%)

서 그에 따른 에너지 소모량을 측정하였다. 데이터 수율(Throughput)은 메시지의 생성 간격을 고정 시킨 상태에서 노드의 수를 증가시키면서 측정하였다.

시뮬레이션에서 비교하는 시스템 군은 기존 맥 프로토콜인 X-MAC과의 성능 비교를 실시하였고 제안하는 SPMC-MAC은 4개로 세분화하여 실시하였다. 이용하는 채널수와 전송 세기 제어의 유무에 따라서 구분한 것이다(1. single channel w/o power control, 2. single channel w/ power control, 3. multi channel w/o power control, 4. multi channel w/ power control).

4.2 에너지 소모 측정

그림 5는 패킷 사이즈가 50 bytes인 경우에 노드 수를 증가시키기에 따라 노드마다 소모하는 평균 에너지의 변화를 보여 준다. 그림 6은 패킷 사이즈가 300 bytes인 경우의 에너지 소모를 나타낸다. 결과를 보면 노드 수가 증가함에 따라 기존의 X-MAC은 급격하게 에너지 소모량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 5에서는 노드의 수가 8일 때 제안한 프로토콜은 기존 프로토콜에 비해 약 5배의 성능 향상을 확인할 수 있고, 그림 6에서는 노드의 수가 8일 때 약 3배의 성능 향상을 확인할 수 있다. X-MAC에서 송신노드는 수신 노드의 깨어날 시점을 모르기 때문에 데이터를 보내기 위해 짧은 프리앰블을 계속해서 보내야하고 이로 인해 노드간에 경쟁과 간섭이 증가하게 된다. 또한 다중 채널과 전송 세기 제어를 사용하는 SPMC-MAC이 사용하지 않는 경우보다 약 0.5배 에너지 소모가 적은 것을 알 수 있다.

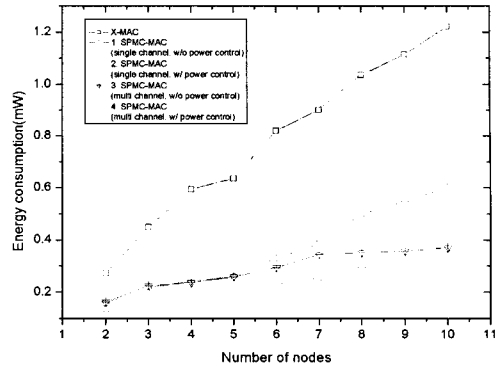


그림 5. SPMC-MAC과 X-MAC의 에너지 소모 비교 (Number of nodes, packet size of 50 bytes.)

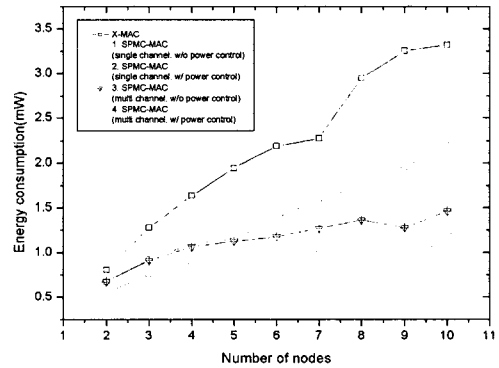


그림 6. SPMC-MAC과 X-MAC의 에너지 소모 비교 (Number of nodes, packet size of 300 bytes.)

그림 7, 8은 메시지 도착 시간(Message Inter-arrival Period)에 따라 노드마다 소모하는 평균 에너지의 변화를 보여 준다. 같은 메시지 도착 시간에서 SPMC-MAC이 X-MAC보다 에너지 소모가 더 작지만 시간 간격이 커짐에 따라 에너지 소모의 차이가 적어지는 것을 알 수 있다. 이것은 메시지 도착 시간이 커짐에 따라 경쟁과 간섭이 적어지기 때문이다.

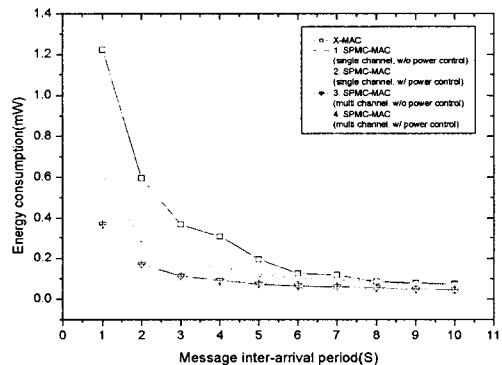


그림 7. SPMC-MAC과 X-MAC의 에너지 소모 비교 (Message inter-arrival time, packet size of 50 bytes.)

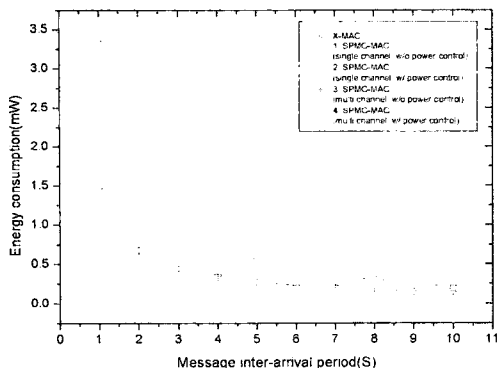


그림 8. SPMC-MAC과 X-MAC의 에너지 소모 비교 (Message inter-arrival time, packet size of 300 bytes.)

4.3 수율 (End-to-End Throughput) 측정

그림 9에서는 그리드 토폴로지(Grid topology)에서 SPMC-MAC과 X-MAC의 수율(Throughput)을 비교하였고 노드의 수를 50에서 200까지 변화시키면서 측정하였다. 그림 10에서는 노드 수의 변화에 따른 패킷 손실율을 측정하였다. 경쟁하는 노드 수에 거의 상관없이 SPMC-MAC이 X-MAC 보다 평균 수

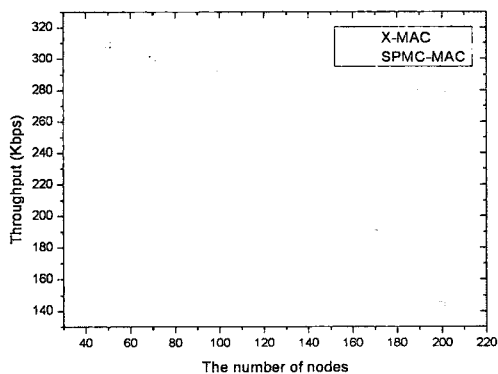


그림 9. SPMC-MAC과 X-MAC의 수율(Throughput) 비교

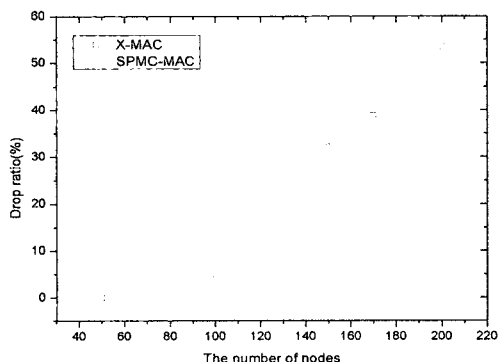


그림 10. SPMC-MAC과 X-MAC의 패킷 손실율(Packet drop ratio) 비교

율(Throughput)에서 좋은 성능을 보여주고, 패킷 손실율에서도 좋은 성능을 보여줄 수 있다. 이 결과는 SPMC-MAC이 다중 채널과 전송 세기 제어를 이용하기 때문에 로드(Load)를 분산시키고 간섭이 줄어들어서 나온 결과이다.

V. 결 론

본 논문에서 제안한 다중 채널과 전송 세기 제어를 사용하는 비동기 방식의 맥 프로토콜인 SPMC-MAC은 에너지 소모를 줄이기 위해 수신 노드의 깨어날 시점을 계산하여 최소의 프리앰블만을 보내고 다중 채널을 이용하여 데이터를 전송하고, 또한 수신 노드의 거리에 따라 전송 세기를 조절한다. 짧은 프리앰블 안에 송·수신 노드가 함께 이동할 랜덤 채널 정보를 포함하여 비동기 방식으로 다중 채널을 사용할 수 있도록 하여 데이터 수율을 향상시켰다. 또한 노드의 배치 밀도가 높을 경우 프리앰블의 전송 세기를 조절하여 노드들이 데이터를 전송하도록 함으로써 불필요한 간섭과 충돌을 회피하였다.

제안하는 맥 프로토콜의 장점으로는 이웃노드의 시작 시간 정보를 바탕으로 짧은 프리앰블의 길이를 더욱 슬림하게 만들어서 에너지 소모를 줄였고, 데이터의 전송 세기 제어를 통해 추가적인 에너지 소모를 줄인 것이다. 또한 다중 채널을 사용하여 데이터의 수율을 향상시킨 것이다.

단점으로는 다중채널과 전송 세기 제어를 사용함으로써 인해 복잡도가 높아지고, 계산량이 많아지며, 노드의 CPU 사용량이 증가할 수 있다. 그리고 이웃노드들에 대한 정보량이 많아짐으로 인해 추가적인 메모리 소요가 발생된다. 그러나 그 소요는 크지 않을 것으로 본다.

결론적으로 제안하는 맥 프로토콜은 기존의 맥 프로토콜보다 에너지 소모를 더 줄이고 데이터의 수율을 향상시키는 효과가 뛰어남을 알 수 있다.

끝으로 앞에서 언급했던 노드 초기화를 통해 만든 이웃노드 정보 테이블을 이용하여 제안 맥의 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 새로운 라우팅 알고리즘에 대한 연구는 향후 과제로 남겨 둔다.

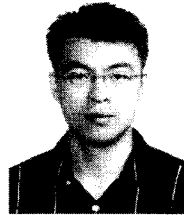
참 고 문 헌

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey,"

- Computer Networks*, Mar. 2002.
- [2] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson. "Wireless sensor networks for habitat monitoring," *ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, Sep. 2002.
 - [3] T. Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks," *ACM SenSys*, Nov. 2003.
 - [4] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," *ACM SenSys*, Nov. 2004.
 - [5] A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, C. Enz, and E. Le Roux, "WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for the wiseNET wireless sensor networks (poster abstract)," *ACM SenSys*, Nov. 2003.
 - [6] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC : A Short Preamble MAC Protocol For Duty-Cycled Wireless Sensor Networks," *ACM SenSys*, 2006.
 - [7] Wei Ye, Fabio Silva, and John Heidemann, "Ultra-Low Duty Cycle MAC with Scheduled Channel Polling," *ACM SenSys*, 2006.
 - [8] Q. S. Wang, X. M. Zhang, T. Ma, and H. Tang, "A survey of power control I ad hoc wireless networks," *Journal of Computer Science*, Jul. 2004.
 - [9] G. Zhou, C. Huang, T. Yan, T. He, J. Stankovic, and T. Abdelzaher, IEEE 802.15 WG, Standard for Part 15.4, "Wireless Medium Access Control Layer (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," Oct. 2003.
 - [10] Crossbow Technology Inc., Mica2 data sheet, <http://www.xbow.com/>.
 - [11] Crossbow Technology Inc., Micaz data sheet, <http://www.xbow.com/>.
 - [12] Moteiv telosb motes. <http://www.moteiv.com>.
 - [13] Chipcon Inc., cc1000 data sheet, <http://www.chipcon.com/>.
 - [14] Chipcon Inc., cc2420 data sheet, <http://www.chipcon.com/>.
 - [15] T. Abdelzaher, "MMSN: Multi-Frequency Media Access Control for Wireless Sensor Networks," *IEEE INFOCOM*, 2006.
 - [16] Z. Zhao, X. Zhang, P. Sun, and P. Liu, "A Transmission Power Control MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *International Conference on Networking*, 2007.
 - [17] ns-2 simulator, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.

윤 장 목 (Jang-Muk Yoon)

정회원



1997년 2월 강남대학교 산업공
학과 졸업
2003년 2월 고려대학교 전산정
보전공 석사
2008년 2월 서울대학교 전기컴
퓨터공학부 석사
<관심분야> 차세대 무선 네트
워크, 네트워크 보안

박 세 응 (Saewoong Bahk)

종신회원



1986년 2월 서울대학교 전기공
학과 석사
1991년 12월 Univ. of Pennsylv
ania 박사
1991년 12월~1994년 3월 AT&T
벨연구소 연구원
1994년 3월~현재 서울대학교 전
기공학부 교수

<관심분야> 차세대 무선 네트워크, 네트워크 보안
워크, 네트워크 보안