

# 무선 센서 네트워크를 위한 효율적인 프리앰블 가상 동기화 기법을 사용하는 저전력 MAC 프로토콜 설계

정회원 이 성 훈, 황 세 욱, 종신회원 이 혁 준, 이 형 근

## Low Power MAC Protocol Design of an Efficient Preamble Exploiting Virtual Synchronization Scheme for Wireless Sensor Networks

Sung-hun Lee, Se-wook Hwang *Regular Members*  
Hyuk-joon Lee, Hyung-geun Lee *Lifelong Members*

### 요 약

무선 센서 네트워크에서 에너지효율은 중요한 이슈가 되고 있다 따라서 센서 노드들의 에너지 소모를 줄이는 MAC 프로토콜과 라우팅 기법이 필요로 한다. 본 논문에서는 X-MAC 프로토콜을 기반으로 가상 동기화 기법 추가하여 주위 환경에 적응적인 센서 MAC 프로토콜을 제안한다. 가상 동기화 기법은 송신 노드가 수신 노드의 활성시간에 맞추어 데이터를 전송하여 송신 노드에서의 프리앰블 전송 횟수를 줄인다. 검증을 위해 NS-2 시뮬레이터를 사용하였으며, 가상 동기화 기법은 기존의 X-MAC보다 10%정도의 에너지 소비의 에너지 효율성을 향상시켰다.

**Key Words** : Wireless Sensor Networks, Energy Efficiency, MAC Protocol, NS-2

### ABSTRACT

The researches about energy efficiency of wireless sensor MAC protocol is an issue in present days. Therefore, MAC and routing protocols for reducing energy consumption at sensor nodes is needed. In this study, a low-power MAC protocol for sensor network is proposed, which in based on X-MAC by exploiting virtual synchronization. The virtual synchronization technique lets senders postpone packet transmission until receivers' wake-up time, so that senders transmit only one or two short preambles. Using NS-2, a proposed MAC protocol improve the energy efficiency by 10% compared with the X-MAC protocol.

### I. 서 론

무선 센서 네트워크는 유비쿼터스 컴퓨팅에서 핵심 기술로 떠오르고 있으며, 센서 기술과 통신 기술의 발달로 인하여 센서 네트워크에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 센서 노드는 주변 환경의 변화

를 탐지하여 그 결과를 저장하고, 각 노드끼리 데이터를 주고받으며 원하는 사용자에게 전달한다. 센서 네트워크 기술은 노드들이 스스로 네트워크를 구성해야 하는 자동구성 특징과 라우터와 데이터 소스의 두 가지 역할을 동시에 수행한다는 점에서는 애드 혹(ad-hoc) 네트워크의 일종이라고 볼 수 있다.

※ 본 연구는 2009년도 광운대학교의 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

본 연구는 중소기업청의 산학연공동기술개발지원사업을 통해 개발된 결과물입니다.

\* 광운대학교 컴퓨터공학과(sunghune@dreamwiz.com)

논문번호 : KICS2009-12-612, 접수일자 : 2009년 12월 8일, 최종논문접수일자 : 2010년 4월 30일

그러나 센서 네트워크 기술은 제한된 노드 자원, 배터리 의존성, 이동성, 데이터 전송 모델, 데이터 집중-융합, 데이터 실시간 특징 및 센서 데이터베이스 같은 차별적인 특성으로 기존의 애드 혹 네트워크보다 더 가혹한 제약사항을 가지고 있으며, 독특하고 다양한 응용 분야를 대상으로 하고 있다. 이러한 이유로 기존의 방법들과는 다른 형태의 프로토콜을 필요로 하게 되었다<sup>11</sup>.

무선 센서 네트워크는 다수의 소형 센서 노드들이 넓은 지역에 분포하여 스스로 네트워크를 형성하고 이를 유지하므로 배터리를 교체하거나 충전하는 것은 거의 불가능하다. 센서 노드들은 주어진 배터리의 수명이 다할 때까지만 원하는 정보를 전달할 수 있으므로, 단-대-단(end-to-end) 전송 시의 1비트를 전달하는데 소모되는 에너지를 줄이는 것이 센서 네트워크의 설계 시 최우선적으로 고려되어야 한다. 즉, 물리 계층뿐만 아니라 상위와도 직접 연결되어 통신을 제어하는 MAC 계층을 설계할 때에도 공평성, 시간지연, 대역폭과 같은 특성보다도 에너지 효율이 중요한 설계 요건이 되어져왔다<sup>21</sup>.

본 논문 II장에서는 무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜 설계 시 고려해야 할 사항들과 비교, 분석되는 B-MAC과 X-MAC의 동작을 정리한다. III장에서는 본 논문에서 에너지 효율성을 높이는 가상 동기화 기법을 소개하고, X-MAC에 추가하여 저전력 센서 MAC 프로토콜을 설계한다. IV장에서는 NS-2 시뮬레이터를 기반으로 기존의 X-MAC 프로토콜과 제안하는 MAC 프로토콜의 성능을 비교한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

무선 센서 네트워크에 적합한 MAC 프로토콜을 개발하기 위해서는 다음과 같은 특성을 고려해야 한다<sup>31</sup>.

첫째로 무선 센서 네트워크에서는 많은 수의 센서 노드들을 영구적으로 사용하기 보다는 일회성의 목적으로 사용하기 때문에 잠재적인 에너지 낭비의 원인들을 제거함으로써 센서 네트워크를 구성하는 노드들의 수명을 장시간 유지시키는 것, 즉 에너지 효율성(energy efficiency)이 매우 중요하다. 무선 센서 네트워크에서는 고려하고 있는 에너지 낭비의 주요 원인은 다음과 같다.

- 충돌(Collision) : 패킷 충돌이 발생하게 되면

패킷의 정보가 손상되어서 사용할 수 없게 된다. 그래서 이 패킷의 재전송이 필요하고 이로 인해 에너지 낭비가 발생한다.

- 오버히어링(Overhearing) : 목적이자 자신이 아닌 다른 노드임에 불구하고 패킷을 수신함으로써 불필요한 에너지가 낭비된다.
- 컨트롤 패킷 오버헤드(Control packet overhead) : 데이터 송수신 외에 네트워크 컨트롤 패킷을 사용한다. 이로 인해 대역폭의 저하와 에너지 낭비가 발생한다.
- 아이들 리스닝(Idle listening) : 언제 데이터를 수신하게 될지 모르기 때문에 대기 상태를 유지한다.

둘째로 확장성(scalability)과 적응성(adaptability)을 들 수 있다. 이 두 특성은 네트워크 규모의 변화나 토폴로지의 변화에 신속하고 효과적으로 대응하는 것을 의미한다. 이러한 네트워크 변화의 요인으로는 제한된 노드의 수명, 노드 추가, 무선 채널의 다양한 간섭으로 인해 연결이 단절되는 경우 등이 있을 수 있다.

마지막으로 일반적으로 중요하게 여기는 패킷 전달 지연(latency), 데이터 처리량(throughput), 대역폭 이용률(bandwidth utilization)이 있다.

이중에서 에너지 효율성이 무선 센서 네트워크에서 첫 번째로 고려되는 주요 사항으로 불필요한 에너지 낭비를 제거하며 에너지 효율성을 높이는 많은 연구가 진행되어 왔다.

### 2.1 Sensor Medium Access Control (S-MAC)

초기의 센서 네트워크의 S-MAC(Sensor-MAC)은 T-MAC(Timeout-MAC)과 같은 동기화 MAC 프로토콜을 사용하였다. 그림 1은 S-MAC의 동기화 예이다. 무선 센서 네트워크에서의 데이터 발생률은 매우 낮은 경우, 노드가 항상 리스닝(Listening)을 유지하는 것은 아이들 리스닝(Idle listening)으로 인한 에너지 낭비의 원인이 된다. 따라서 이런 문제점을 해결하기 위해서 네트워크에 참여한 센서 노드들은 같은 주기의 듀티 사이클(duty-cycle)을 가지며 같은 시간에 활성화하고 휴면한다. 이러한 동기화를 위해 사용되는 주기적인 싱크 패킷 교환과 스케줄링 유지비용으로 에너지 효율성이 떨어지고 설계 측면에서도 구현이 복잡하다. S-MAC에서는 두 노드간의 통신을 위해 RTS/CTS 제어 신호를 듣는 이웃 노드들은 두 노드간의 통신이 완료할 때까지

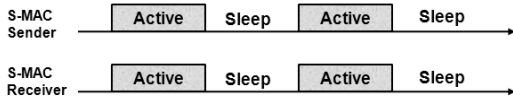


그림 1. S-MAC의 동기화 예

수면 모드로 전환되어 오버히어링(overhearing)으로 인한 에너지 낭비 문제를 해결하고자 했지만 CSMA-CA 방식으로 매체에 접근하므로 RTS/CTS 제어 패킷을 사용하여 추가적인 제어 패킷 오버헤드로 인한 에너지 낭비 발생한다<sup>4)</sup>.

2.2 T-MAC(Timeout-MAC)

T-MAC(Timeout-MAC) 프로토콜은 S-MAC의 고정된 듀티 사이클 기법을 가변적인 듀티 사이클 기법으로 수정하여 제안되었으며, 아이들 리스닝으로 인한 에너지 낭비를 줄여줌으로써 에너지 효율성을 개선하였다. T-MAC에서 동작하는 모든 노드들은 이웃 노드와 통신하기 위해 주기적으로 깨어나서 전송하지만 데이터가 없으면 다음 활성 시까지 슬립 상태로 전환되며, 슬립 상태 시 도착한 데이터는 큐에 저장된다. 노드들은 통신하기 위해 CSMA/CA 메커니즘 기반의 RTS, CTS, DATA, ACK를 사용하여 충돌을 회피하고, 데이터 전송에 있어서 신뢰성을 보장한다. 이러한 방식은 활성 시간동안 데이터를 한꺼번에 전송하고, 송수신 데이터가 없다면 일정한 시간의 타이머(TA)를 동작시켜 S-MAC보다 일찍 슬립 상태로 전환함으로써 불필요한 아이들 리스닝 에너지를 줄일 수 있다.

그림 2은 S-MAC과 T-MAC의 동작을 비교하였다. 듀티 사이클이 고정된 S-MAC은 정해진 활성 시간동안 송수신할 데이터의 유무와 상관없이 아이들 리스닝 상태를 유지한다. 이에 반해 T-MAC은 정해진 타이머(TA) 동안 이벤트가 발생하지 않으면 슬립 상태로 전환하여 불필요한 아이들 리스닝을 제거하여 S-MAC에 비해 에너지 효율성을 향상시

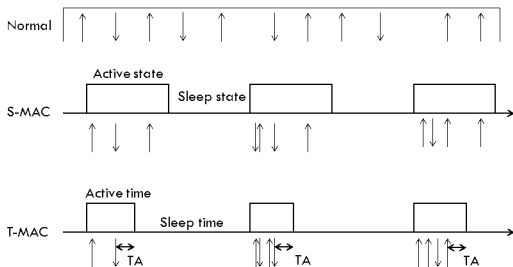


그림 2. S-MAC과 T-MAC의 동작 비교

켰다<sup>5)</sup>.

2.3 Berkeley MAC (B-MAC)

무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜인 S-MAC은 모든 노드들이 동시에 깨어나서 싱크 패킷을 주고 받으며 동기를 맞춘다. 이와 같은 동기화 과정은 프로토콜 오버헤드(protocol overhead)로 작용하여 에너지 소모요인이 된다. 이러한 문제를 해결하고자 Berkeley-MAC (B-MAC)은 비동기적 MAC 프로토콜을 제안하였다. B-MAC 프로토콜로 동작하는 노드들은 동일한 체크인터벌(check interval) 간격으로 각각 다른 시간에 깨어난 뒤, CSMA 방식으로 매체에 접근하며 채널에 유효한 신호가 있는지 여부를 확인하는 LPL(Low Power Listening)과 긴 프리앰블을 사용하여 낮은 전력 소모 통신을 가능하게 한다. 그림 3의 상단 B-MAC에서 LPL기법과 긴 프리앰블을 사용한 통신과정을 보여준다<sup>6)</sup>.

패킷 전송을 원하는 노드는 휴면 주기보다 약간 긴 프리앰블을 전송한다. 휴면 모드에서 깨어난 노드는 채널을 샘플링하여 긴 프리앰블을 감지하고 데이터를 수신받기 위해 대기한다. 긴 프리앰블 전송을 마친 송신 노드는 목적지 주소를 포함한 데이터 패킷을 전송하며 해당 목적지 노드는 이 데이터 패킷을 성공적으로 수신한다. 이와 같이 노드들은 이웃노드들과 동기화 될 필요가 없으므로 동기화 패킷 교환과 스케줄 유지 기능과 같은 동기화 오버헤드를 제거하여 에너지 소비를 줄이고 설계도 간단해졌다. B-MAC은 기존의 동기화 방식의 MAC 프로토콜보다 에너지 효율성을 많이 향상시켰지만 오버히어링(overhearing) 문제는 여전히 존재한다. 휴면 모드에서 깨어난 노드는 채널을 샘플링하고 만약 진행 중인 긴 프리앰블이 있다면 자신이 목적

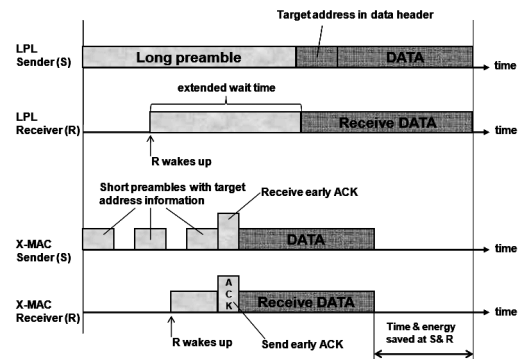


그림 3. B-MAC의 LPL 방식과 X-MAC의 스트로브 프리앰블 방식의 비교

지 노드인지 아닌지에 상관없이 긴 프리앰블이 끝날 때까지 대기해야 하므로 불필요하게 에너지가 소요된다. 이러한 오버헤어링 문제는 네트워크 노드의 밀집도가 높아질수록 심화되고 결국 네트워크 생존시간을 감소시킨다.

### 2.4 X-MAC

X-MAC 프로토콜은 B-MAC 프로토콜에서 사용하는 프리앰블로 인한 오버헤어링 문제를 해결하기 위해 비트동기를 위한 최소한의 프리앰블과 목적지 주소가 수납된 스트로브 프리앰블(Strobed Preamble)을 여러 번 송신함으로써 B-MAC 프로토콜에서 발생하는 프리앰블 오버헤어링을 감소시키고 X-MAC으로 동작하는 노드는 자신이 송신할 데이터가 있는 경우 인접 노드에게 전송할 데이터가 있음을 알리기 위하여 최소한의 프리앰블과 목적지 주소로 구성된 스트로브 프리앰블을 송신한 뒤 얼리 애크 (Early ACK)를 수신할 수 있는 충분한 기간 동안 수신대기상태를 유지하는 기법을 추가하였다<sup>7)</sup>. X-MAC으로 동작하는 노드는 자신이 송신할 데이터가 있는 경우 인근 노드에게 전송할 데이터가 있음을 알리기 위하여 최소한의 프리앰블과 목적지 주소로 구성된 쇼트-프리앰블을 송신한 뒤 ACK를 수신할 수 있는 충분한 기간 동안 수신 대기 상태를 유지한다. 여기서의 ACK를 얼리 애크라고 한다.

그림 3의 하단은 X-MAC의 통신 과정을 보여준

다. 노드는 더 이상 하나의 긴 프리앰블을 전송하지 않는다. 대신에 목적지 노드의 정보를 내장한 짧은 프리앰블을 주기적으로 전송한다. 휴면 모드에서 깨어난 노드는 채널을 샘플링하고 프리앰블이 탐지되면 프리앰블에 내장된 목적지 주소 정보를 검사한다. 만약 자신을 위한 프리앰블이 아니라면 더 이상 듣지 않고 곧바로 휴면 모드로 전환하므로 오버헤어링 문제를 해결할 수 있다. 만약 자신을 위한 프리앰블이라면 얼리 애크를 전송하여 데이터 수신이 준비됨을 알린다. 얼리 애크는 프리앰블 패킷 사이의 짧은 정지 기간 동안 전송되며 얼리 애크를 수신한 노드는 더 이상 짧은 프리앰블을 전송을 정지하고 곧바로 데이터 패킷을 전송한다. 이렇게 짧은 프리앰블과 짧은 정지 기간의 연속을 스트로브 프리앰블이라 하며, 이러한 기법을 사용함으로써 통신에 참여하는 두 노드의 에너지 소비량과 지연시간을 줄일 수 있다.

## III. 에너지 효율적인 저전력 MAC 프로토콜 제안

### 3.1 기존 MAC 프로토콜의 문제점

S-MAC과 T-MAC은 대표적인 동기화 센서 MAC 프로토콜로서 노드들끼리 데이터 교환에 앞서 동기화가 이루어진다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 S-MAC은 주기적으로 활성화와 휴면 모드를 반복함으로써 계속 파워를 켜두는 것에 비해 상당히 많은 에너지 소모를 줄일 수 있다. 하지만 활성화 상태일 때만 데

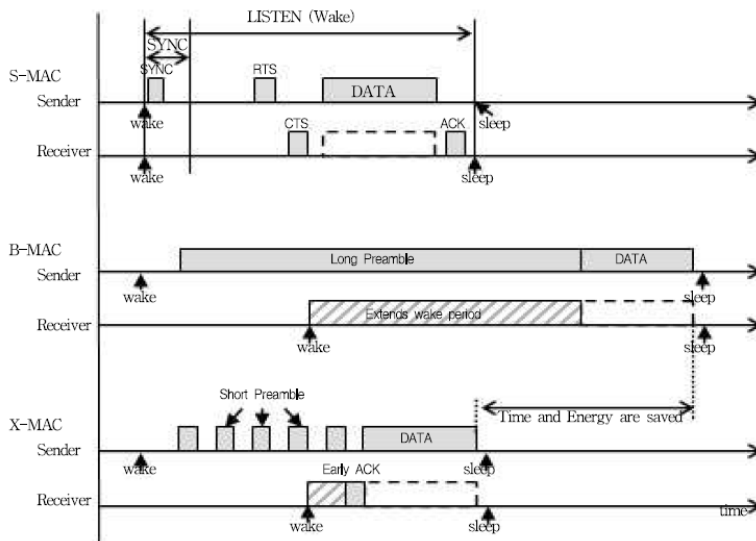


그림 4. 동기 및 비동기 방식의 MAC 프로토콜 동작 비교

이더 송수신이 가능하기 때문에 데이터를 전송하고자 하는 노드는 상대방이 언제 활성화되는지 알아야 한다. S-MAC에서는 이를 위해 네트워크를 구성하는 모든 노드의 라디오 파워를 같은 주기로 활성/휴면 하도록 한다. 이를 동기화 과정이라고 하면 S-MAC에서는 동기화를 위해서 노드들이 주기적으로 싱크 패킷을 주고받아 동기화를 이룬다. 이와 같이 동기를 맞추기 위해서 주기적으로 전송되는 싱크 패킷들과 이를 수신하기 위해 설정된 싱크 기간은 전체적으로 큰 에너지 손실을 유발하게 되고, 네트워크의 크기가 커질수록 모든 노드들의 동기를 맞추는 것이 어려워진다. T-MAC은 불필요한 아이들 리스닝 상태를 제거함으로써 S-MAC에 비해 에너지 효율성을 높였으나, S-MAC과 같이 컨트롤 패킷에 의한 오버헤드를 제거하지 못했다. 이를 개선하기 위해 비동기화 방식인 B-MAC과 X-MAC이 제안되었다. B-MAC과 X-MAC은 동기화 센서 MAC 프로토콜에 비해 매우 간단한 구조를 가진다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이 B-MAC은 각각의 노드들이 서로의 동기를 맞추는 필요가 없다. 대신에 전송을 시도하는 노드는 상대 노드가 수신할 수 있도록 슬립 구간보다 긴 프리앰블 전송 구간을 갖는다. 이웃 노드들은 주기적으로 활성/휴면 하면서 활성구간에서 CCA(Channel Clear Assessment)를 수행하는데 이때 전송 에너지가 감지되면 계속 활성 상태를 유지하며 자신에게 오는 패킷이 있는지 기다리게 된다. 하지만 긴 프리앰블 전송으로 인해서 전송 노드와 수신노드에서 불필요한 에너지 낭비가 발생하며 이는 이웃 노드와 데이터 흐름이 많아질수록 커지게 된다. 또한 데이터 충돌을 긴 프리앰블과 데이터 송신 이후에 알 수 있기 때문에 애드혹 네트워크에서 큰 충돌 문제를 가진다. X-MAC은 이러한 긴 프리앰블을 여러 개의 짧은 프리앰블 전송으로 문제점을 보완하였다. 이와 같이 비동기 방식의 MAC 프로토콜은 동기화를 위한 오버헤드가 없으며 동기 방식에 비해 매우 간단한 구조를 가지는 장점이 있다. 하지만 비동기 방식의 MAC 또한 주기적으로 발생하는 휴면 구간으로 인해서 전송 지연이 발생하게 되는데 이를 슬립 지연(Sleep latency)라고 한다. X-MAC은 동기 MAC 프로토콜이나 B-MAC에 비해서 확률적으로 적은 슬립 지연을 발생하지만 홉이 증가할수록 슬립 지연 또한 크게 증가한다. 따라서 데이터 량이 많은 시에는 듀티 사이클을 증가시켜 슬립 지연을 줄여야 한다<sup>[8],[9]</sup>.

### 3.2 이웃 노드간의 가상 동기화 기법

X-MAC 프로토콜은 짧은 프리앰블 전송 방식으로 B-MAC에 비해 에너지 효율성을 향상시켰다. 하지만 송신 노드는 수신 노드의 활성 시간을 알지 못하므로 데이터가 큐에 들어온 시간부터 짧은 프리앰블을 전송하기 시작하므로 얼리 애크를 수신하기 전까지 불필요한 에너지가 낭비된다. 그림 5과 같이 기존의 X-MAC 프로토콜을 사용하면 송신 노드 A와 같이 수신 노드가 얼리 애크를 전송해 주기 전까지 짧은 프리앰블을 지속적으로 전송하게 된다. 최악의 경우 수신 노드의 슬립 상태 내내 전송하게 되어 에너지 낭비가 심하다.

이 같은 문제점을 해결하고자 이웃 노드들끼리 가상 동기화 기법을 제안한다. 이웃 노드들의 활성 시간을 기억하여 데이터를 전송하고자 할 때 해당 이웃노드의 활성 시간 직전에 짧은 프리앰블을 전송하게 한다. 이 기법을 사용하기 위해 무선 센서 네트워크의 데이터 흐름 패턴을 활용한다. 무선 센서 노드는 필드에서 센싱한 데이터를 직접 혹은 멀티 홉 방식으로 싱크에게 전달한다. 무선 센서 네트워크는 효율적인 데이터 전달을 위해 여러 에너지 인지형 라우팅 알고리즘이 제안되었으며, 이러한 라우팅 알고리즘으로 선정된 다음 중간 경로 노드는 배터리가 고갈되기 전까지 유지된다. 즉, 센싱 필드의 모든 노드들은 바로 경로상의 다음 중간 경로의 활성 시간을 기억한다면 데이터 전송 시 짧은 프리앰블 전송 횟수를 줄일 수 있다.

가상 동기화 기법을 위해 그림 6와 같이 각 노드들은 휴면에서 활성으로 깨어난 직후와 활성에서 휴면으로 전환되기 직전에 동기화 패킷을 전송한다. 이 동기화 패킷은 싱크로의 경로상의 앞 뒤 노드들을 위한 것이다. 노드 A는 노드 B가 언제 활성화될지 알고 있으므로 노드 B에 맞추어 활성화되고 짧은 프리앰블을 전송하여 통신을 시작할 수 있다. 즉 노드 A는 점선으로 표시된 시간만큼 에너지 소비를

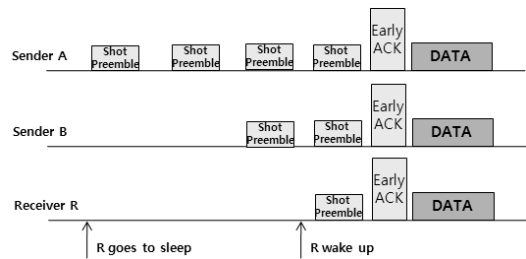


그림 5. X-MAC에서 지속적인 프리앰블 전송의 문제점

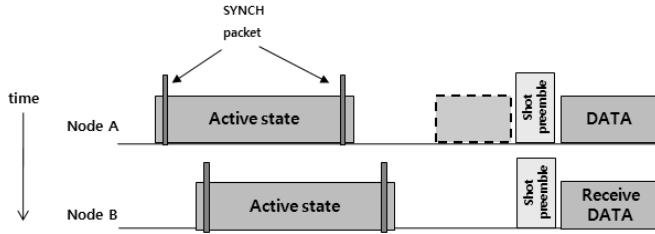


그림 6. 가상 동기화 기법으로 인한 프리앰블 전송 지연

줄일 수 있다.

이웃 노드로부터 자신이 목적이 아닌 짧은 프리앰블을 수신한 노드는 슬립 상태로 전환하므로 이웃노드에게 자신의 수정된 듀티 사이클 주기 정보를 알려줘야 한다. 그림 7에서 각 노드는 인접한 이웃 노드끼리 통신한다고 가정한다. 노드 D는 노드 C로부터 짧은 프리앰블을 수신하고 난 후, 한 개의 동기화 패킷이 전송될 시간만큼 얼리 액크의 전송을 지연한다. 이 기간 동안 노드 B는 자신과는 무관한 짧은 프리앰블을 수신하였으므로 슬립 상태로 전환해야한다. 그전에 싱크 노드로의 경로상의 이전 노드 A에게 동기화 패킷을 전송하여 자신이 슬립 상태로 전환됨을 알린다. 이 때 노드 A는 노드 B로부터 동기화 패킷을 수신하여 노드 B가 언제 활성 상태로 전환 될지 알고 있다. 즉, 노드 A가 노드 B로 전송할 데이터가 있을 경우, 노드 B의 활성시간에 맞추어 짧은 프리앰블을 전송하여 통신을 시작할 수 있다. 이와 같이 이웃 노드의 활성 시간을 기억하고, 활성 시간에 맞추어 자신도 활성하여 통신을 시작함으로써 기존의 X-MAC에 비해 송신 노드에서의 짧은 프리앰블 전송 횟수를 줄여 에너지 효율성을 향상시킬 수 있다.

이때 사용되는 동기화 패킷은 코디네이터로부터 할당받은 2 바이트의 짧은 주소와 1 바이트의 활성/휴면 플래그만을 사용하므로 짧은 프리앰블에 비해

1/10 수준의 작은 사이즈이므로, 동기화 패킷의 추가로 인한 에너지 낭비보다 가상 동기화로 인한 에너지 절약 효과가 더 크지만 모든 노드들이 자신의 활성 시간 짧으면 주기적으로 동기화 패킷을 전송하므로 오버헤드가 생기게 된다. W/S Flag 필드는 송신 노드의 스케줄링 정보를 배열 형식으로 나타낸 것으로 프레임 포맷을 맞추기 위해 1바이트로 표현 하였습니다. 그림 8은 새로 사용되는 동기화 패킷의 구조이다. 기본적으로 사용되는 헤더(header)와 푸터/footer)를 제외하고 필요한 정보는 3바이트이다.

동기화 패킷을 통한 정확한 활성화 시작 시간을 파악하는 방법이 마련되어야 한다. 비동기 MAC 프로토콜에서는 각 노드간의 시간 동기화가 이루어지지 않아 시간 값의 비교가 어렵기 때문이다. 센서 노드 운영체제로는 TinyOS를 사용한다. TinyOS<sup>[10]</sup>는 이벤트 기반의 경량급 운영체제로서 Mica Mote에 포팅될 때 주어진 작업을 처리하기 위해 꼭 필요한 컴포넌트만으로 구성되어 컴파일 된다. Mica Mote<sup>[11],[12]</sup>상에서의 네트워킹 기능과 관련된 Tiny 컴포넌트 구조도로서 크게 물리계층, 통신계층, 응용계층의 세 부분으로 구분된다. 물리계층은 일종의 하드웨어 부분으로 클럭과 센싱 모듈 그리고 실제 데이터 송수신 및 통신 모듈의 온오프를 위한 RF 모듈로 구성되며, 응용계층은 데이터 트래픽 제어를

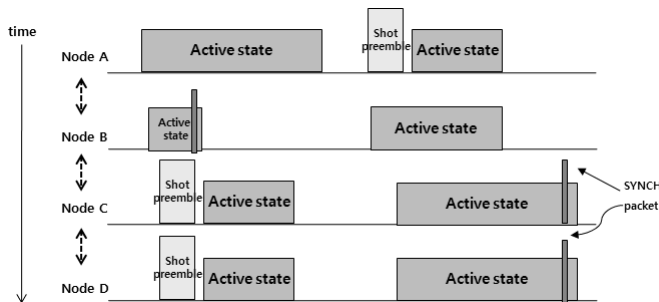


그림 7. 가상 동기화 기법의 예

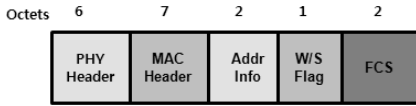


그림 8. 동기화 패킷 구조

위한 테스트 애플리케이션과 센싱 제어를 위한 센싱 애플리케이션으로 구성된다. 통신계층은 라우팅 및 MAC 기능을 담당하는 일종의 소프트웨어 부분이다. MAC 계층에 대한 구현이 논리적으로 정확하게 동작하고 동기 신호를 정확하게 맞추기 위해 각 노드들의 듀티 사이클을 동일하게 해 주면 현재 시간을 나타내는 심볼(Symbol) 단위의 시간 정확도로 디바이스를 동기화 시킬 수 있다.

#### IV. 실험 결과 및 분석

실험은 설계와 구현을 마친 NS-2 기반으로 하였으며 표 1과 같은 특성을 가지고 노드의 개수를 늘려가며 소모 전력을 측정하였다<sup>[3]</sup>. 전력 소모는 칩 콘사의 CC2430 안테나를 모델로 하였고 송수신기의 상태전환 시간(turnaround)에 데이터의 전송이 없다고 하면 송수신기의 상태전환 시간(turnaround)에서 소요되는 전력은 임의로 0로 한다.

표 1은 NS-2로 시뮬레이션 할 때 시나리오 구성에 관한 것이다. PHY 계층은 2.4GHz 대역을 사용하고 250kbps의 대역폭을 사용한다. 전파 모델은 TwoRayGround를 사용하여 송신기와 수신기 사이에 거리에 따른 전파세기를 규정하였다. 큐 타입은 디폴트값인 DropTail을 사용하여 FIFO(first in first out) 스케줄링을 사용하고 큐가 꽉 차면 버퍼 오버플로우(buffer overflow)가 발생시켜 저장하지 않고 버린다. 안테나는 OmniAntenna를 사용하여 전방향 통신이 가능하게 하였고, 라우팅 프로토콜은

표 1. 실험에 사용되는 시뮬레이션 파라미터

Operation	Time
sleep duration	0.5s
long preamble	0.5s
short preamble	0.025s
early ACK	0.025s
CCA duration	128ms
Switch to Rx/Tx	192ms

DumbAgent를 사용하여 각 디바이스 간에 원 홉으로 라우팅 한다. 또한 캐리어 센싱(carrier sensing) 스톱시홀드(threshold)와 수신 스톱시홀드는 5M로 설정하여 이웃 노드와만 통신하도록 하였다. 토폴로지는 점대점 토폴로지를 사용하였다. 트래픽 조건은 CBR(constant bit rate)로 하였으며 패킷 인터벌을 1s로 설정하였으며 패킷 사이즈 100 바이트로 한다. 여기에 MAC 헤더 7 바이트와 PHY 헤더 6 바이트가 더해져 실제 113 바이트가 채널 상에 전송된다. 시뮬레이션에서 적용되는 노드의 각 상태에 대한 전력소모 특성은 표 2와 같으며, 라디오의 상태를 변환하거나 초기화 하는 과정에서 소모하는 시간과 에너지는 모두 0이라고 가정하였다. 마지막으로 노드의 이동성은 고려하지 않았으며 1홉 통신부터 5홉 통신까지 변화를 주어 성능을 측정하였다.

노드 0을 PAN 코디네이터로 설정하여 네트워크를 시작하고, 각 노드는 이웃 노드와만 통신할 수 있도록 통신 반경을 제한하였다. 또한 오른쪽 노드 5번에서 왼쪽 노드 0번으로 트래픽 방향을 고정하였으며, 매초마다 돌아가면서 전송하도록 한다.

먼저 기존의 X-MAC 논문에서 확인했듯이 짧은 프리앰블의 전송은 B-MAC의 긴 프리앰블 전송 기법에 비해 상당히 많은 에너지 소비를 줄였다. 본 논문에서 제안하는 가상 동기화 기법이 적용된 MAC 프로토콜을 Proposed MAC이라 하였다.

그림 9에 서로 체인 토폴로지 상황에서 데이터 전송시 Proposed MAC의 에너지 소비를 살펴보면 기존의 X-MAC에 비해 소폭으로 줄어들었다. 이 이유로 노드들이 각자의 듀티 사이클을 가지고 동작하다가, 처음으로 데이터를 송수신을 할 때 발생하는 몇 개의 짧은 프리앰블 전송만을 제거했기 때문이다. 첫 데이터 송수신이 끝난 후, 송신 노드와 수신 노드는 같은 시간에 휴면 모드로 전환한 후, 다시 활성화 되므로 서로의 듀티 사이클 간격이 맞

표 2. 실험에 사용되는 노드의 전력 소모 특성.

Index	Value
transmit 1byte	25mA
receive 1byte	27mA
sleep 32ms	1μA
idle 32ms	500μA
CCA	108mA
Switch to Rx/Tx	0mA

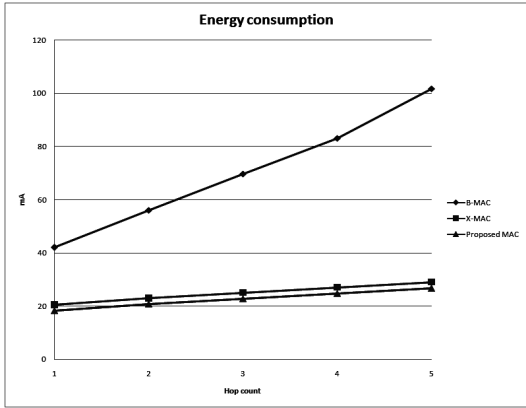


그림 9. 체인 토폴로지에서의 MAC 프로토콜의 에너지 소비량 비교

아 떨어진다. 예를 들어 노드 5에서 노드 4로 데이터를 전송할 때 노드 5는 노드 4가 활성화되기 전까지 대기하다가 짧은 프리앰블을 전송하여 데이터 전송을 개시한다. 통신이 완료되면 노드 5와 노드 4는 같은 시간에 휴면 상태로 전환한다. 이제 노드 4가 노드 3으로 데이터를 전송하고자 할 때, 노드 4는 노드 3이 활성화되기 전까지 기다렸다가 노드 4와 노드 5는 통신과 마찬가지로 같은 시간에 휴면 상태로 전환한다. 이와 같이 체인 토폴로지 상황에서 PAN 코디네이터로 데이터의 전송이 계속되어도 모든 노드의 듀티 사이클 구간이 같아지게 되므로 큰 효과가 나타나지 않았다. 이 기법이 큰 효과를 거두기 위해서는 데이터 발생률이 휴면 기간보다 적을수록 좋다. 즉 수신 노드가 슬립 상태일 경우 송신 노드가 짧은 프리앰블을 전송하는 것을 억제할 때 가상 동기화 기법으로 인한 에너지 낭비를 제거할 수 있다. 현재 NS-2로 시뮬레이션을 진행할 때 CBR rates를 1s로 슬립 기간보다 크게 설정하였다.

그림 10은 스타 토폴로지 상황에서 에너지 소비량을 측정하였다. 이 경우 체인 토폴로지에 비해 전반적으로 에너지 소비량이 증가하였고, 특히 노드 개수가 늘어나면서 상승폭은 더 커졌다. 이것은 바로 옆의 이웃 노드의 싱크 패킷과 프리앰블을 수신하던 체인 토폴로지에 비해, 스타 토폴로지에서는 네트워크에 연결된 모든 노드의 패킷을 수신하였기 때문이다. 한 개의 코디네이터가 PAN 중심에 있고 그 주위에 노드들을 위치시켜 실험하므로 가상 동기화로 인한 에너지의 소비는 큰 차이가 없지만 기존의 X-MAC보다는 약간의 전력량을 감소시킬 수

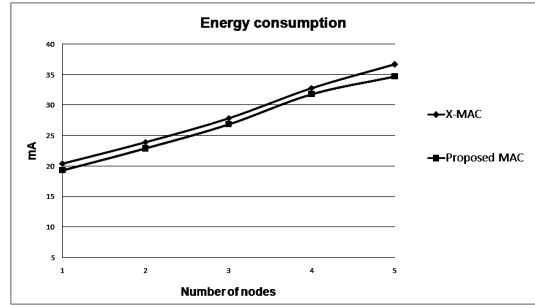


그림 10. 스타 토폴로지에서의 MAC 프로토콜 에너지 소비량 비교

있음을 알 수 있다. 즉, 프리앰블의 패킷 전송에 따른 에너지 소비를 줄였다.

## V. 결론

본 논문은 센서 네트워크에서 데이터 전송시 에너지 소모를 최소화할 수 있는 활성화와 휴면 상태의 듀티 사이클의 가상 동기화를 통해 에너지 효율성이 높은 센서 MAC 프로토콜을 설계하고자 하였다. 동기 방식의 MAC 프로토콜보다 컨트롤 패킷 오버헤드와 스케줄링 오버헤드가 제거된 가상 동기화 방식을 선택하였고, 에너지 효율성의 최대 문제인 아이들 리스닝 시간을 줄이는데 중점으로 연구하였다. 제안하는 센서 MAC 프로토콜이 기존의 MAC 프로토콜보다 성능이 우수함을 시뮬레이션 결과로 확인하였다. 따라서 제안하는 MAC 프로토콜은 주변 노드와의 최적화된 전송 전력 수준을 연산하고 관리하며 전송시 해당 노드와의 최적화된 전송 전력 수준으로 전송하는 방법을 통하여 센서 네트워크의 에너지 효율을 향상시킨다. 제안하는 MAC 프로토콜의 성능 개선을 위한 연구를 지속적으로 수행하고, 노드의 밀집도, 노드들 간의 평균 거리 등의 변수사항을 실험하고 판별하는 과정을 거쳐 더 효율적인 MAC 프로토콜을 연구하고 성능평가를 추진할 계획이다.

## 참고 문헌

- [1] Prasad Raviraj, Hamid Sharif, Michael Hempel, Song Ci, "An Energy Efficient MAC Approach for Mobile Wireless Sensor Networks," IEEE, pp.565-570, 2006.
- [2] Muneeb Ali, Umar Saif, Adam Dunkels,



“Medium Access Control Issues in Sensor Networks,” ACS SIGCOMM Computer Communication, Vol.36, No.2, April, 2006.

[3] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, and Fatih Alagöz, “MAC Protocol for Wireless Sensor Network: A Survey,” IEEE Communications Magazine, pp.115-121, April, 2006.

[4] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An energy efficient mac protocol for wireless sensor networks,” In 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'02), New York, NY, USA 2002.

[5] T. van Dam and K. Langendoen, “An adaptive energy efficient mac protocol for wireless sensor networks,” In 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), pp.171-180, 2003.

[6] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks,” In The Second ACM Conference on Embedded Networked Sensors Systems (SenSys), pp.95-107, November 2004.

[7] Michael Buettner, Gary V Yee, Eric Anderson, Richard Han. “X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol For Duty-Cycled Wireless Sensor Networks,” Conference On Embedded Networked Sensor Systems, pp.308-320, 2006.

[8] 변강호, “무선 센서 네트워크를 위한 효율적인 프리엠블 샘플링 기법을 사용하는 비동기 MAC 의 성능 분석”, 제45권, CI편 제2호, 전자공학회 논문지, pp.70-77, 2007.

[9] 김준석, 권영구, “무선 센서 네트워크에서 수신 구간 분산 배치를 통한 전송 지연 감소 방안”, 한국 ITS 학회, 학술대회논문집, pp.225-229, 2007.

[10] <http://www.tinyos.net>

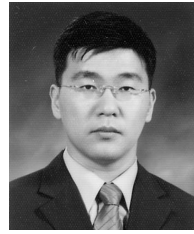
[11] <http://www.xbow.com>

[12] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>

[13] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

이 성 훈 (Sung-hun Lee)

정회원



2002년 2월 강남대학교 전자공학과 학사

2004년 2월 광운대학교 전파공학과 석사

2004년 3월~현재 광운대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 무선네트워크, 센서 네트워크, 전송데이터링크

황 세 욱 (Se-wook Hwang)

정회원



2007년 2월 광운대학교 컴퓨터공학과 학사

2009년 8월 광운대학교 컴퓨터공학과 석사

2009년 9월~현재 유비쿼스(주) 개발6팀 연구원

<관심분야> 무선네트워크, 센서 네트워크

이 혁 준 (Hyunk-joon Lee)

중신회원



1987년 8월 Michigan University 컴퓨터공학과 학사

1989년 6월 Syracuse University 컴퓨터공학과 석사

1993년 12월 Syracuse University 컴퓨터공학과 박사

1996년 2월 삼성전자(주) 멀티미디어 연구소 선임연구원

1996년 3월~현재 광운대학교 컴퓨터공학과 교수

<관심분야> 차량간 통신, 초고속 무선랜, Ad-hoc networking

이 형 근 (Hyung-keun Lee)

중신회원



1987년 2월 연세대학교 전자공학과 학사

1993년 9월 삼성전자(주) 선임연구원

1998년 12월 Syracuse University 컴퓨터공학과 석사

2002년 12월 Syracuse University

컴퓨터공학과 박사

2003년 9월~현재 광운대학교 컴퓨터공학과 교수

<관심분야> 무선네트워크, 센서네트워크, 전송데이터링크