

Sub-GHz 대역에서 저전력 원거리 통신을 위한 비경쟁방식의 수신자 주도 MAC 프로토콜 설계

이준범*, 이재호^o

Receiver-Initiated Contentionless MAC Protocol for Sub-GHz LPWAN

Joonbeom Lee*, Jaeho Lee^o

요약

무선 센서 네트워크는 대개 한정적인 배터리로 동작되는 센서 노드로 형성되기 때문에 저전력으로 동작될 수 있는 MAC 프로토콜의 활발한 연구가 진행되어 왔다. 하지만 기존의 수신 노드 주도식 MAC 프로토콜은 송신 노드가 언제 전송될지 모르는 수신 노드의 비콘을 Idle Listening 상태로 기다리면서 불필요한 에너지를 소모하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 단점을 보완하기 위해 Idle Listening을 개선한 저전력 비동기식 Collisionless Receiver Initiated-MAC(CRI-MAC) 프로토콜을 제안한다. 또한, CRI-MAC은 수신 노드의 비콘을 수신하기 전에 송신 노드간의 우선순위를 결정하고 충돌 없이 데이터 패킷을 전송하여 처리율을 높였다. CRI-MAC의 실험 결과는 기존에 제안된 수신 주도식 MAC 프로토콜에 비해 전송 처리율과 에너지 효율이 향상되는 결과를 보였다.

Key Words : MAC, LPWAN, Sub-GHz, Receiver-Initiated, Contentionless

ABSTRACT

Previously, low-powered MAC protocols have been studied with various technical view point because typical sensor node would be operated under limited energy resource. The previous Receiver-Initiated MAC protocols have a disadvantage of unnecessary energy consumption due to Idle Listening states where sender can not know when the receiver's beacon will be transmitted. In this paper, we propose a low powered asynchronous Collisionless Receiver Initiated-MAC(CRI-MAC) protocol to address unnecessary Idle Listening power consumption. Moreover, we devised a new prioritization method in order to accomplish contentionless data transmission without minimized collision occurrence before a sender initially transmit to the corresponding receiver, then we get increased throughput via our scheme. The results of CRI-MAC experimentation showed that transmission throughput and energy efficiency are improved comparing with the previous Receiver-Initiative MAC protocols.

I. 서론

무선 센서 네트워크는 대개 사람의 접근이 어려운

지역의 필요한 데이터를 수집하는 기능을 갖춘 다수의 무선 센서 노드를 배치함으로써 형성된다. 무선 센서 노드는 데이터 송수신 동작에 필요한 에너지를 한

* 이 논문 또는 저서는 2017년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1D1A3B04034151)

• First Author : Korea University, Dept. of Electrical and Computer Engineering, sldofvge12@naver.com, 학생회원

◦ Corresponding Author : Seowon University, Dept. of Information and Communications Engineering, izeho@seowon.ac.kr, 정회원
논문번호 : KICS2017-03-071, Received March 13, 2017; Revised May 17, 2017; Accepted June 14, 2017

정된 배터리에 의존할 수밖에 없다. 따라서 사람의 접근이 어려운 지역의 노드 배치로 인해 에너지를 모두 소모한 센서 노드의 배터리 교환은 어렵거나 불가능한 경우가 많다. 따라서 무선 센서 네트워크는 데이터 패킷의 효율적인 전송 처리보다는 Medium Access Control(MAC)계층, 네트워크계층 등에서 에너지의 효율 측면에 더 많은 관심을 가지고 연구가 활발히 진행되고 있다^[1].

무선 센서 네트워크에서는 어떤 종류의 MAC 프로토콜을 사용하는 지에 따라서 에너지 소비 효율이 현저한 차이를 보인다. 따라서 MAC 프로토콜 설계에 있어서 가장 최우선으로 고려해야 하는 것은 제한된 에너지 용량을 가진 각 노드들의 불필요한 송수신을 줄여 에너지 수명을 증가 시켜야 하는 것이다. MAC 프로토콜은 주기적인 동기 신호에 따라 듀티 사이클을 가지는 동기식 MAC 프로토콜과 비동기식 MAC 프로토콜로 분류한다.

동기식 MAC 프로토콜의 대표적인 방식 S-MAC^[2], T-MAC^[3] 등이 있다. 이러한 MAC 프로토콜들은 주기적인 스케줄에 맞추어 일어나서(Wakeup mode)보낼 데이터가 있으면 데이터를 전송한 후, 다시 잠드는 동작을 반복하는 방식의 듀티 사이클을 적용하여 에너지 소비효율에 좋은 프로토콜이다. 하지만 보낼 데이터가 없는 경우에도 동기를 맞추기 위해 일어나야 한다는 점은 Idle Listening을 증가시켜 에너지 측면에서 매우 큰 단점으로 작용될 수 있다.

비동기식 MAC 프로토콜은 B-MAC^[4], X-MAC^[5], Receiver initiated-MAC (RI-MAC)^[6], Receiver Centric-MAC (RC-MAC)^[7] 등과 같은 송신 노드 주도식(Sender-Initiated)과 수신 노드 주도식(Receiver-Initiated)으로 분류할 수 있다. 송신 노드 주도식의 B-MAC은 Low Power Listening(LPL)의 긴 프리앰블을 적용하였다. 송신노드는 수신노드가 일어나서 Beacon을 브로드캐스트해줄 때 까지 기다린 후, 수신노드의 Beacon을 수신하면 채널이 유희한지 Clear channel Assessment(CCA)를 통해 판단하고 데이터를 보낸다. 하지만 B-MAC은 수신 노드의 주기보다 긴 프리앰블이 끝나고 데이터 패킷을 보내야 하기 때문에 에너지 소비가 크고 처리속도도 낮다.

X-MAC은 B-MAC의 단점인 LPL의 문제점을 보완한 기법이다. B-MAC과 달리 보낼 데이터가 있으면 연속적으로 짧은 프리앰블(Short preamble)을 보낸 후 수신 노드의 응답을 기다리고 응답이 없으면 짧은 프리앰블을 다시 보내는 것을 반복한다. 또한 수신 노드

가 송신 노드의 짧은 프리앰블에 자신이 수신 대상인지를 판단하고 자신이 수신 대상이라면 ACK를 보냄으로써 송신 노드가 프리앰블 패킷을 모두 전송하지 않고도 데이터를 송신할 수 있는 장점이 있다. 하지만 X-MAC은 여전히 해결 하지 못한 송신노드의 프리앰블 샘플링 에너지 소모와 Early ACK 구간의 삽입으로 Idle Listening 시간이 증가되는 단점이 존재한다.

수신 노드 주도식의 RI-MAC, RC-MAC 등은 송신 노드 주도식의 단점인 송신 노드의 프리앰블 샘플링으로 인한 채널 점유 시간을 없애며 전력소모를 보완하고 송신노드간의 패킷충돌 또한 사전에 방지할 수 있어 처리율을 향상시키는 장점이 있다. 하지만 기존의 수신 노드 주도식 MAC Protocol은 에너지 보완과 처리율을 향상 시켰지만 노드의 수가 많을수록 오버히어링(Overhearing)과 히든 터미널(Hidden Terminal)문제 등 개선의 여지가 많은 프로토콜이다.

본 논문에서는 Sender Prioritization(SP)를 이용해 송신노드들의 데이터전송 순서를 정하여 사전에 충돌을 예방한다. 또한 수신 노드가 Receiver Beacon(RB)를 브로드캐스트하면 첫 번째 순서의 송신노드를 제외하고는 모두 Sleep하며 자신의 전송순서에 맞게 일어나 데이터를 보내어 기존의 수신 노드 주도식 MAC 프로토콜에 비해 에너지를 현저히 줄일 수 있는 CRI-MAC을 제안하고자 한다.

II. 연구 배경

앞에서 서술한 바와 같이 한정적인 배터리로 동작하는 무선 센서 네트워크는 배터리의 교환이 어렵기 때문에 각 센서의 불필요한 동작을 줄여 에너지 수명을 증가 시키는 것이 가장 중요하다. 따라서 무선 센서 네트워크는 어떤 종류의 MAC 프로토콜을 적용하는지에 따라 에너지 효율이 현저한 차이를 보인다.

본 논문의 연구 주제인 수신 노드 주도식 MAC 프로토콜은 동기식 MAC 프로토콜과 송신 노드 주도식 MAC 프로토콜보다 에너지 효율 측면에서 좋은 평가를 얻고 있다. 수신 노드 주도식 MAC 프로토콜의 기본적인 동작은 송신노드가 보낼 데이터가 있을 시, 일어나서 수신 노드의 비콘을 수신 할 때 데이터 통신이 이루어지는 기본적인 구조로 이루어진다.

그림 1은 수신 노드 주도식의 대표적인 MAC 프로토콜인 RI-MAC의 기본 동작 방식이다. RI-MAC은 송신 노드가 보낼 데이터가 있다면 데이터 발생시점부터 수신 노드가 Beacon을 브로드캐스트해줄 때까지 Idle Listening 상태로 대기하고 수신 노드의

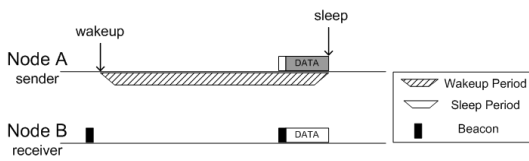


그림 1. RI-MAC의 기본 동작 방식
Fig. 1. Operating method of RI-MAC

Beacon을 수신하면 데이터를 보내는 방식이다. 이전의 송신 노드 주도식 X-MAC과 비교했을 때 송신 노드의 프리앰블을 없애고 에너지 소모를 보완하였지만 그림 1과 같이 수신 노드의 비콘 주기가 길다면 그만큼 송신 노드가 Idle Listening 상태로 에너지를 소모 하면서 오랫동안 대기해야 하기 때문에 오랜 Idle Listening 상태는 에너지 효율 측면에서 단점으로 작용될 수 있다. 또한 히든 터미널 문제점으로 충돌을 미연에 회피하는 방법이 아니라는 점에서 에너지 효율이 낮아질 수 있다.

만약 RI-MAC에서 송신 노드간 데이터 충돌이 일어난다면 수신 노드는 충돌 알림 비콘을 통해서 데이터를 보낸 송신 노드들 에게 브로드캐스트 한다. 그 후 충돌 알림 비콘을 받은 송신 노드들은 랜덤 백오프(Random Backoff)를 진행하고 먼저 랜덤 백오프를 마친 송신노드가 우선권을 갖고 데이터를 보내게 된다.

우선권을 갖은 송신노드의 데이터를 수신한 수신노드는 ACK를 브로드캐스트하게 되는데 아직 데이터를 보내지 못한 송신 노드는 ACK를 수신하게 되면서 다시 랜덤 백오프를 진행하여 데이터를 보내게 된다. 이처럼 랜덤 백오프를 이중 이상으로 사용하는 충돌 해결 기법은 송신노드와 수신노드 모두 에너지 소비가 매우 크기 때문에 이와 같은 해결 기법은 에너지 효율 측면에서 적합하지 않으며, 따라서 이에 대한 해결방안이 요구된다.

RC-MAC은 수신 노드의 Beacon을 기다리는 것은 동일 하지만 RI-MAC과는 다르게 데이터를 보내기 전 충돌을 방지할 수 있는 기법을 적용하였다. 보낼 데이터가 있는 송신 노드는 수신 노드의 Beacon을 수신하면 랜덤 백오프를 진행하고 데이터를 보낸다.

그림 2와 같이 수신 노드는 단일 홉으로 이루어진 이웃 노드들의 스케줄 리스트를 유지하고 제일 먼저 랜덤 백오프를 마친 송신 노드의 데이터를 수신한다. 제일 먼저 랜덤 백오프를 마친 송신노드의 데이터 수신 완료되면 수신 노드는 ACK를 통해 데이터수신을 완료를 알려준과 동시에 스케줄 리스트를 참고하여 다음 순번의 송신 노드에게 스케줄링 해준다. 이와

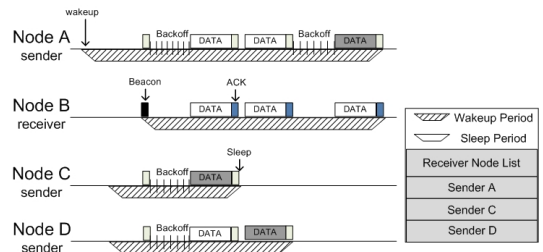


그림 2. RC-MAC의 기본 동작 방식
Fig. 2. Operating method of RC-MAC

같은 방법으로 충돌을 미연에 방지하여 처리율을 높였다.

하지만 그림 2의 Sender A는 수신 노드가 스케줄링 해줄 때 까지 많은 에너지를 소모하며 기다려야 하고 경쟁에 참여하는 송신노드가 하나여도 랜덤 백오프를 진행해야하기 때문에 에너지 소비가 크다. 또한 모든 노드들이 항상 주변노드의 리스트를 최신화하며 유지해야하기 때문에 무선 센서 네트워크를 구축하는 노드의 수가 많을수록 이와 같은 기법은 큰 단점으로 작용될 수 있다.

III. CRI-MAC 프로토콜 설계

II장에서 언급되었던 충돌 해결 기법과 데이터를 보내기 전 송신 노드간의 경쟁을 통한 우선순위를 정하고 스케줄링을 받는 기법은 불필요한 동작을 포함하고 있어 에너지 효율측면에서 단점으로 작용되고 있다. 따라서 에너지 비효율적인 동작을 줄이고 Idle Listening 상태를 개선하여, 송신자간 충돌을 사전에 방지할 수 있고 이로 인하여 불필요한 재전송을 줄여 패킷 전송율을 올릴 수 있는 방법을 제시한다.

3.1 CRI-MAC 적용환경 분석

본 고에서 제안한 CRI-MAC 프로토콜은 Sub-GHz 대역에 적합하게 설계되었다. 최근 Sub-GHz 대역의 통신에 대한 연구의 필요성이 강조되고 있으며 기존의 2.4GHz 대역은 Wi-fi, Bluetooth, Zigbee 등으로 매우 혼잡하기 때문에 Sub-GHz 대역을 사용하면 혼잡한 대역을 피할 수 있어 대역 간섭이 매우 낮아지고 기존의 2.4GHz보다 적은 송신 전력으로 동작할 수 있다.

또한 그림 3과 같이 저전력으로 동작하며 통신반경이 1km 내외로 가능하다면 Wi-Fi, Bluetooth Low Energy(BLE)^[8], Zigbee^[9] 등과 비교했을 때 적은 전력으로 원거리의 통신 커버리지가 가능하기 때문에 사물인터넷, 스마트 그리드 등에 매우 적합하고 노드

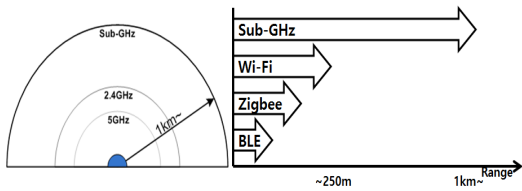


그림 3. ISM 대역 통신 거리 비교
Fig. 3. The Comparison of Communication range in ISM Band

가 밀집된 지역에서는 히든 터미널 문제점을 현저히 줄일 수 있다.

3.2 CRI-MAC 프로토콜 동작절차

본 고에서 제안하는 CRI-MAC 프로토콜은 기존의 수신 노드 주도식 RI-MAC, RC-MAC과는 다르게 주기적인 수신노드의 RB를 수신하기 전에 송신노드의 SP를 이용하여 송신노드의 전송순서를 정하여 충돌을 회피하는 기법이다. 수신노드의 RB를 수신한 송신노드들 중, 순위에서 밀려난 송신노드들은 자신보다 우선순위에 있는 노드의 패킷길이 만큼 Sleep 상태를 유지하고 자신의 순번에 맞게 일어나 패킷을 전송할 수 있는 새로운 방식의 저전력 프로토콜이다.

CRI-MAC에서도 보낼 데이터가 있는 송신 노드들이 일어남과 동시에 주변 노드에게 SP를 브로드캐스트하며, 수신 노드의 주기적인 비콘을 수신할 때까지 Idle Listening 상태에서 기다리기 때문에 제안하는 기법의 초반부는 기존의 수신 노드 주도식 기법들과 동일하다. 하지만 기존의 수신자 주도의 MAC 프로토콜 기법들과는 달리 CRI-MAC은 Idle Listening 구간에서 수신 노드의 RB를 받기 전까지 송신 노드간의 전송순서 결정을 통해 전송순서를 정한 뒤 충돌을 미연에 방지하여 처리율을 증가 시켰다.

그림 4와 같이 Node A는 보낼 데이터 패킷이 있는 즉시 일어나서 자신이 보낼 목적지주소와 데이터 패

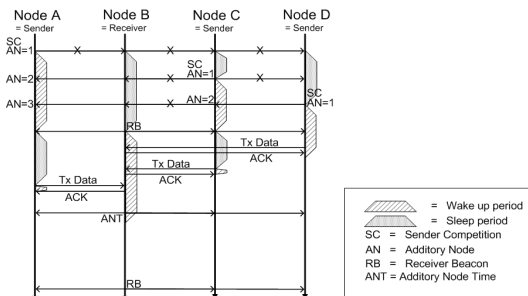


그림 4. CRI-MAC의 송신노드 전송 우선순위 결정
Fig. 4. The Process of priority transmission of sender in CRI-MAC

킷의 길이를 포함하는 SP를 브로드캐스트한다. 하지만 Node A가 SP를 브로드캐스트한 시점에 다른 송신 노드들은 일어나지 않아 Node A의 SP를 수신하지 못한다. Node A가 SP를 브로드캐스트한 후, 보낼 데이터가 생긴 Node C는 이전의 Node A와 동일한 방식으로 주변 노드에게 목적지 노드 주소와 데이터 패킷 길이를 포함하는 SP를 브로드캐스트하며 일어난다. 그러나 Node A와는 달리 Node C가 SP를 브로드캐스트하는 시점에는 이미 Node A가 SP를 브로드캐스트하고 Idle Listening 상태로 대기하기 때문에 Node A는 Node C의 SP를 오버헤어링하게 된다.

Node A는 목적지 노드의 주소를 포함하는 Node C의 SP가 자신이 보내려고 하는 목적지 노드의 주소와 다르다면 전송순서를 의미하는 Additory Node(AN)을 증가시키지 않고 수신 노드의 RB를 수신할 때까지 기다린다. 만약 그림 4와 같이 자신과 동일한 주소와 데이터 패킷 길이를 포함하는 Node C의 SP를 오버헤어링 한다면 Node A는 기본적으로 1로 정의되어 있는 AN을 증가시키게 되어 자신의 전송순서 AN을 2로 만든다. Node C의 경우에는 자신이 SP를 브로드캐스트한 후 아직 자신과 동일한 목적지를 갖는 송신노드의 SP를 오버헤어링 하지 않았기 때문에 전송순서 AN은 1이다.

추가적으로 Node A와 Node C가 일어난 이후에 동일한 목적지 노드를 갖는 Node D가 SP를 브로드캐스트한다면 Node A와 Node C는 Node D의 SP를 오버헤어링할 것이다. Node A는 목적지 노드가 동일한 Node D의 SP를 오버헤어링 했기 때문에 이전의 전송순서 AN에 1을 더한 전송순서 AN 3이 될 것이다. 따라서 Node C도 동일한 기법으로 전송순서 AN에 1을 더해 AN이 2가 되어 2번째의 전송순서를 갖는다.

결과적으로 송신노드들은 수신 노드인 Node B의 RB를 수신하기 전까지 SP를 통해 전송순서를 결정하게 된다. 수신노드인 Node B가 RB를 브로드캐스트한다면 Node A는 3, Node C는 2, 다른 송신 노드의 SP를 오버헤어링 하지 않은 Node D는 1로 자신의 전송순서를 갖고 데이터를 전송하여 충돌 없이 패킷을 전송하여 전송 처리율을 높일 것이다.

한편 Node A가 가장 먼저 일어났지만 가장 높은 순위으로 데이터 패킷을 전송한다. 우선순위 결정에 참여한 노드의 수가 많을수록 먼저 일어난 송신노드는 전송순서가 뒤로 밀려나는 것이 단점으로 작용할 수 있지만 수신노드의 RB를 수신한 시점부터 Node A는 Node C, Node D의 데이터 패킷 길이와 수신노드 ACK의 전송시간을 계산하여 자신의 전송순서가

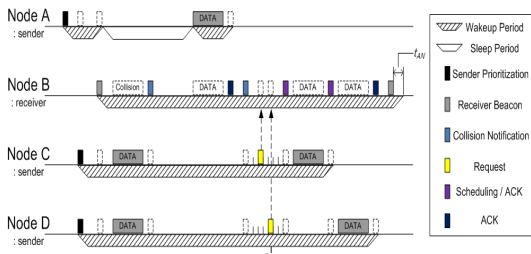


그림 7. CRI-MAC의 충돌 해결 기법
Fig. 7. Collision resolution technique of CRI-MAC

일어난 송신노드는 충돌이 일어났음을 인지하지 못하기 때문에 수신노드의 Collision Notification (CN)을 이용하여 충돌이 일어났음을 알려주게 된다. 또한, 수신노드의 CN 브로드캐스트 시점에 ACK를 받기 위해 리스닝 상태로 대기하는 송신노드들과는 달리 Node A는 Sleep상태이기 때문에 충돌을 일으킨 송신노드들만 CN을 수신하게 된다.

충돌이 일어나지 않은 환경의 수신노드는 송신노드의 데이터 패킷을 모두 수신하면 일정시간을 기다린 후 RB를 브로드캐스트한다. 하지만 충돌이 일어나는 상황에서는 수신 노드가 자신에게 발생된 충돌정보를 송신 노드에게 알리기 위하여 추가적인 CN을 브로드캐스트 한다. 충돌을 인지하여 리스닝상태로 대기하는 Node C와 Node D는 추가적인 CN을 수신하게 되는데 송신노드는 수신노드가 정해진 백오프 윈도우 사이즈에 맞게 랜덤 백오프를 진행하게 되고 랜덤 백오프를 완료하는 대로 수신노드에게 Request 비콘을 브로드캐스트 한다.

따라서 수신 노드는 자신이 정한 백오프 윈도우 사이즈만큼 리스닝 상태로 기다리며 송신 노드의 Request 메시지를 수신한 순서대로 스케줄링 해준다. 그림 7과 같이 Node C는 Node D보다 랜덤 백오프를 빨리 완료하여 Request 메시지를 수신노드에게 먼저 전송했기 때문에 목적지 주소를 포함하는 Scheduling Beacon(SB)를 통해 Node C가 먼저 스케줄링 받는다. 아직 스케줄링 받지 못한 Node D에게는 Node C의 데이터 패킷 전송이 완료된 후 Node D의 주소를 포함하는 SB를 통해 스케줄링 해주며 충돌을 해결한다.

이후 수신노드는 더 이상 스케줄링 해줄 노드가 없기 때문에 기본 동작 방식과 동일하게 RB를 브로드캐스트한 후 t_{AN} 만큼 대기하고 Cycle을 끝낸다. 제안한 충돌 해결 기법은 불필요한 동작을 개선하여 에너지를 보완하였고 스케줄링과 랜덤 백오프를 이용하여 허든 터미널 문제로 충돌이 일어나는 상황에서도 기

존의 수신 노드 주도식 MAC Protocol 보다 패킷 처리율을 높일 수 있다.

IV. 성능 평가

4.1 시뮬레이션 환경

본 장에서는 제안하는 CRI-MAC 프로토콜의 성능을 평가하기 위해 NS-2를 사용하여 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 CRI-MAC 프로토콜과 수신 노드 주도식의 대표적인 RI-MAC 및 RC-MAC 프로토콜의 평균 패킷 충돌 발생률, 평균 패킷 전송률, 평균 에너지 소비량을 측정하였고 송신 노드 주도식의 대표적인 X-MAC과는 노드의 수와 트래픽 변화에 따른 평균 에너지 소비량의 측정 결과를 분석하는 형태로 진행하였다.

성능 평가에서 사용되는 시뮬레이션 환경은 표 1과 같이 각 실험모델에 동일한 파라미터를 적용하였다. 또한 노드 수의 증가에 따른 성능을 평가하기 위해 2~49개로 노드가 증가되는 환경을 구성하였고 각 노드간의 거리는 Sub-GHz 대역의 통신 커버리지를 고려해 1000m로 구성하였다. 수신 노드의 위치는 정중앙에 배치하였으며 송신노드와 수신노드는 1hop으로

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation Parameters

Parameters		value	unit
SIFS		192	μs
Data transmission time		24	ms
ACK transmission time		4	ms
Size of Beacon and ACK		5	bytes
Size of DATA		30	bytes
Node Number		2~49	EA
Simulation Time		1000	sec
Transmission Range		1000	m
Frequency band		868	MHz
Energy consumption	Rx	5.4	mA
	Tx	13.4	mA
	Idle	0.4	mA
	Sleep	0.7	μA
Backoff Window	CRI-MAC	32~128	slots
	RI-MAC	32	slots
	RC-MAC	32	slots
Tx Power		10	dBm

구성된다. 시뮬레이션 시간은 1회당 1000sec씩 총 10 회 진행한 후, 평균값을 산출하였고 트래픽량은 각 실험에 따라 가변적으로 설정하였다. 또한 모든 실험에서 관찰된 최대값과 최소값을 측정하여 각 그래프의 에러바(error bar)를 통해 나타내었다.

성능 평가의 MAC 프로토콜의 세부 파라미터는 Sub-GHz 대역에서 동작되는 CC1310^[10]의 data sheet 를 참조하였다. 또한 수신 노드의 비콘 Interval은 5초 로 동일하며 송신 노드의 데이터 Traffic은 10초 이하 의 Random Interval로 설정하였다.

4.2 데이터 충돌 발생률과 데이터 전송률 결과

본 실험은 노드수의 변화에 따른 충돌 발생률과 데이터 전송률의 결과를 관찰하기 위하여 수행되었다. 그림 8은 노드 수가 증가되는 환경에서의 충돌 발생률을 측정하였고 그림 9는 노드 수의 증가에 따른 데이터 전송률을 측정하여 CRI-MAC, RI-MAC, RC-MAC의 시뮬레이션 결과를 도출하였다.

그림 8과 같이 비교적 노드의 수가 적은 환경에서 CRI-MAC과 RC-MAC은 비교적 동일한 충돌 발생률이 일어나는 결과를 볼 수 있다. 하지만 RI-MAC은 전송 우선순위 기법을 적용하지 않았기 때문에 노드가 많아질수록 충돌 발생률이 비교적 높게 나타난다. 따라서 그림 8에서 나타나듯이 노드의 수가 증가할수록 전송 우선순위 기법을 적용한 프로토콜은 충돌 발생률이 현저히 낮은 결과를 보인다.

RC-MAC은 비콘을 수신한 후, 송신 노드들이 랜덤 백오프를 진행하고 데이터를 보내기 때문에 전송 우선순위 기법을 적용한 CRI-MAC과 충돌 발생률이 비교적 동일한 결과를 볼 수 있다. 또한, RC-MAC은 수신 노드가 스케줄링 테이블을 참조하여 테이블 순서에 맞게 송신 노드를 스케줄링 해줌으로써 노드의 수가 적은 환경에서는 충돌 발생률을 줄여 데이터 전송률을 높일 수 있다. 하지만 그림 9와 같이 RC-MAC은 노드의 수가 증가할수록 송신 노드가 동일한 백오프 윈도우 사이즈를 가질 수 있는 확률이 높기 때문에 데이터 전송률이 낮아지는 결과를 볼 수 있다.

제안된 CRI-MAC은 수신 노드의 비콘을 받기전 송신 노드들의 SP를 이용하여 전송 우선순위를 정하여 충돌을 사전에 방지한다. 따라서 CRI-MAC은 RI-MAC과 RC-MAC에 비해서 충돌 발생률을 줄이고 데이터 전송률을 높였다. 하지만 노드의 수가 많고 노드들이 밀집된 지역에서 다른 송신 노드들 보다 일찍 일어난 상태에 진입하여 다량의 SP를 오버헤어링 한 송신노드들은 가장 늦게 데이터를 보내는 큰 단점

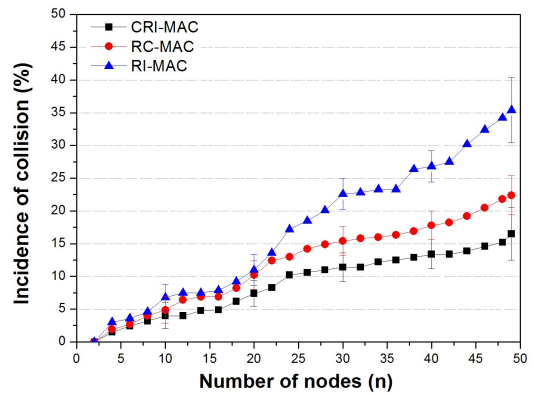


그림 8. 노드 수의 따른 평균 충돌 발생률 비교
Fig. 8. Comparison results of collision occurrence according to number of nodes

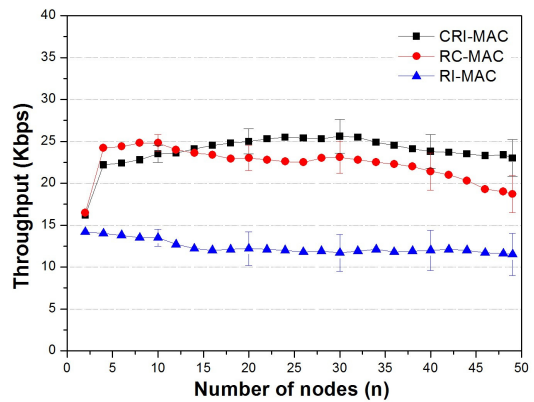


그림 9. 노드 수의 따른 평균 데이터 전송률 비교
Fig. 9. Comparison results of average throughput according to number of nodes

이 존재한다. 그러나, Sub-GHz 대역에 적합하게 설계된 CRI-MAC은 적은 노드의 수 배치로 광범위한 커버리지 통신이 가능하기 때문에 위와 같은 단점을 극복할 수 있다.

4.3 평균 에너지 소비량 측정 결과

본 절에서는 그림 10 및 그림 11과 같이 증가되는 노드의 수에 따른 에너지 소비량과 데이터 트래픽의 증가에 따른 에너지 소비량을 측정하였다. 먼저, 증가되는 노드 수의 변화에 따른 에너지 소비량은 기존 실험과 동일한 환경을 구성하여 결과를 도출하였다.

노드의 수가 적은 환경에서는 각 실험모델의 에너지 소비량이 비교적 동일하게 측정되었다. 하지만 그림 10과 같이, 노드의 수가 증가할수록 기존의 RI-MAC과 RC-MAC, X-MAC은 CRI-MAC보다 높은 에너지 소비량이 발생하는 결과를 볼 수 있다.

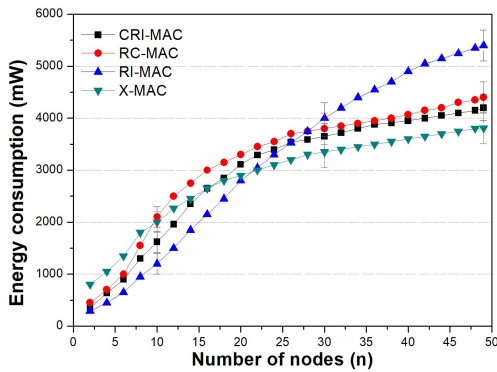


그림 10. 노드 수의 따른 에너지 소비량 비교
Fig. 10. Comparison results of energy consumption according to number of nodes

RI-MAC은 사전에 충돌을 방지하는 기법이 아니기 때문에 노드의 수가 증가할수록 충돌확률이 높다. 따라서 이를 해결하기 위해 잦은 랜덤 백오프의 동작이 에너지효율 측면에서 큰 단점으로 작용된다.

RC-MAC은 송신노드가 수신노드의 비콘을 수신한 뒤 랜덤 백오프를 진행하여 전송 우선순위를 정하고 수신 노드의 스케줄링 비콘을 기다린다. 따라서 송신 노드의 수가 많은 환경일수록, Idle Listening 상태로 스케줄링 비콘을 기다리는 시간이 길어지기 때문에 노드가 많은 환경에서는 비교적 높은 에너지 소비량이 발생하는 결과를 볼 수 있다. 또한 경쟁하는 송신 노드가 없더라도 랜덤 백오프를 진행한 후 데이터 패킷을 보내야 하기 때문에 데이터 트래픽이 적은 환경에서도 단점으로 작용될 수 있다.

송신 노드 주도식의 대표적인 X-MAC은 송신 노드가 보낼 데이터가 있을시, 짧은 프리앰블 전송과 Early ACK 구간의 반복적인 동작을 통해 수신노드의 ACK를 받는다면 즉시 데이터 패킷을 보내고 잠이 든다. 따라서 Early ACK의 활용으로 무의미한 Idle period를 줄여 에너지 소비량을 줄였다. 또한 데이터를 보내고 즉시 잠이 들 수 있기 때문에 노드의 수가 많아질수록 평균 에너지 소비량은 낮아지는 것을 볼 수 있다. 하지만 그림 10과 같이 노드의 수가 적은 환경에서는 언제 전송될지 모르는 수신 노드의 ACK를 기다리며 반복적인 프리앰블 전송과 Early ACK구간으로 인해 에너지 소비량이 비교적 높게 나타난다.

본 고에서 제안하는 CRI-MAC은 수신 노드의 비콘을 수신하기 전, 송신 노드간 SP를 통해 전송 우선순위를 정하고 자신의 순서에 맞게 데이터를 전송한다. n 개의 송신노드 SP를 오버헤더링한 송신 노드는 자신 보다 전송 우선순위가 낮은 송신 노드의 데이터

패킷 시간과 수신 노드의 ACK 전송 시간을 합한 t_{DA} 알 수 있기 때문에, 식 1과 같이 t_{IL} 만큼 Sleep 상태를 유지하여 Idle Listening 구간을 없애고 불필요한 에너지 소모를 줄였다.

$$t_{IL} = N_{AN}(t_{DA} + t_{SIFS}) \tag{1}$$

따라서, 전송 우선순위가 높은 송신 노드들은 비콘을 수신한 후, 자신의 순서가 올 때 까지 t_{IL} 만큼 Sleep 상태를 유지하기 때문에 노드의 수가 증가할수록 기존의 MAC 프로토콜보다 평균 에너지 소비량이 낮은 결과를 관찰할 수 있다.

그림 11은 노드의 수가 25개로 구성된 환경에서, 100초 동안 송신 노드의 데이터 트래픽을 지속적으로 증가시키면서 에너지 소비량에 대한 결과를 측정하였다. 그림 11과 같이 전송 우선순위 기법이 적용되지 않은 RI-MAC은 데이터 트래픽의 증가에 따라 히든 터미널 문제가 빈번히 발생하였으며, 이에 따른 데이터 패킷 충돌을 해결하기 위한 잦은 랜덤 백오프로 인해 에너지소비량이 비례적으로 상승하는 결과를 보인다.

RC-MAC은 스케줄링 비콘을 통해 RI-MAC의 충돌문제를 개선함으로써 데이터 트래픽이 높은 환경에서는 비교적 낮은 에너지소비량을 보인다. 하지만 RC-MAC은 비콘을 수신한 후, 랜덤 백오프를 진행하고 데이터 패킷을 전송하기 때문에 주변 노드가 많고 트래픽이 낮은 환경에서는 수신노드의 스케줄링 비콘을 기다리는 시간으로 인해 RI-MAC 보다 에너지소비량이 높은 결과가 나타난다.

X-MAC의 경우 Early ACK로 인해 데이터 트래픽이 적은 환경에서는 데이터를 즉시 보내고 잠이 들어 비교적 좋은 성능을 보여준다. 하지만 데이터 트래픽

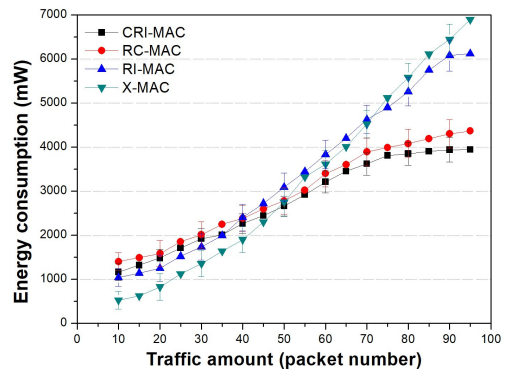


그림 11. 데이터 트래픽의 증가에 따른 에너지 소비량 비교
Fig. 11. Comparison results of energy consumption according to traffic amount

이 증가될수록 이전의 데이터를 보내고 즉시 잠이 들더라도 이후의 보낼 데이터가 즉시 생기기 때문에 수신 노드의 주기적인 듀티 사이클로 인해 ACK를 오래 기다려야한다. 따라서 짧은 프리엠블과 Early ACK 구간도 증가되기 때문에 그림 11과 같이 데이터 트래픽이 증가될수록 반복적인 짧은 프리엠블과 Early ACK 구간이 단점으로 작용되어 에너지 소비량이 늘어나는 결과를 볼 수 있다.

제안된 CRI-MAC 프로토콜은 낮은 트래픽 환경에서는 RI-MAC, X-MAC과 비교적 동일한 에너지소비를 보이는 결과가 나타난다. 하지만 CRI-MAC 프로토콜은 송신노드의 SP를 이용한 전송 우선순위 기법과 t_{AV} 만큼 Sleep 상태를 유지하기 때문에 그림 11과 같이 트래픽이 증가할수록 비교적 좋은 평균 에너지 효율의 결과를 볼 수 있다.

4.4 평균 전송 지연시간 측정 결과

본 절에서는 수신 노드가 비콘을 브로드캐스트하는 시점부터 송신 노드가 ACK를 수신할 때까지의 단 대 단 평균 지연시간 측정 결과를 나타낸다. 그림 12 및 그림 13과 같이 전송 지연시간은 모든 송신 노드의 전송 지연시간의 평균값으로 노드 수의 증가와 트래픽 증가에 따른 결과를 도출한다. 그림 12와 같이 노드의 수가 적은 환경에서는 비교적 모두 동일한 전송 지연시간을 보이지만 노드의 수가 많아질수록 제안하는 CRI-MAC의 전송 지연시간이 비교적 짧게 나타나는 것을 볼 수 있다. CRI-MAC은 RI-MAC과 다르게 수신노드의 비콘을 수신하기 전에 송신 노드간의 전송 우선순위 정하고 송수신하여 충돌을 방지하기 때문에 비교적 짧은 전송시간을 갖는다. 하지만 RI-MAC은

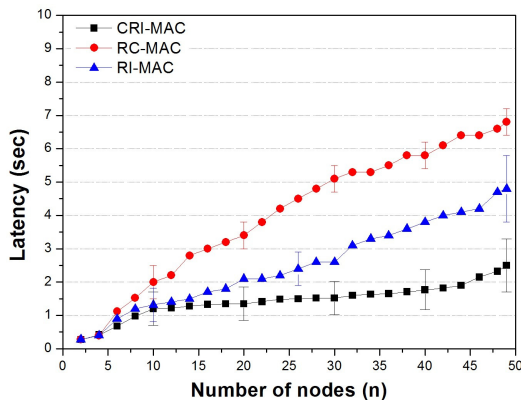


그림 12. 노드 수의 따른 전송 지연시간 비교
Fig. 12. Comparison results of latency according to number of nodes

충돌 회피 기법을 적용하지 않아 노드의 수가 많아질수록 충돌확률이 높다. 또한, 충돌을 해결하는 기법을 적용하였지만 충돌을 해결하는 과정에서 다시 충돌이 일어날 가능성이 높기 때문에 지연시간이 길게 나타난다.

RC-MAC은 노드의 수가 많아질수록 전송 지연시간이 길게 나타나는데, 이와 같은 결과가 나타나는 이유는 스케줄링 기법을 적용하기 때문이다. RC-MAC은 수신 노드의 비콘을 수신하고 랜덤 백오프를 진행하여 충돌을 예방하여 전송률을 높였지만, 가장 먼저 랜덤 백오프를 마친 송신 노드가 2개 이상이라면 충돌이 일어난다. 따라서 충돌이 일어나지 않은 송신 노드들도 수신 노드의 스케줄링을 받지 못하기 때문에 전송 지연시간이 가장 길게 측정된다.

그림 13과 같이 트래픽의 증가에 따른 전송 지연시간측정은 25개의 노드로 구성된 환경에서 실험하였다. 제안된 CRI-MAC은 트래픽 증가에 따른 실험에서도 비교적 낮은 전송 지연시간을 보인다. RC-MAC은 데이터 트래픽이 증가할수록 전송 지연시간이 길게 나타나는 것을 볼 수 있다. 데이터 트래픽이 증가되는 환경에서는 스케줄링 기법을 적용하기 때문에 RI-MAC보다 충돌 발생률은 낮은 결과를 보였지만, 그림 13의 결과와 같이 데이터 트래픽이 낮은 환경에서는 경쟁에 참여한 송신 노드가 자신뿐이더라도 랜덤 백오프를 진행한 후 수신 노드의 스케줄링을 받기 때문에 전송지연 측면에서는 낮은 효율을 보인다.

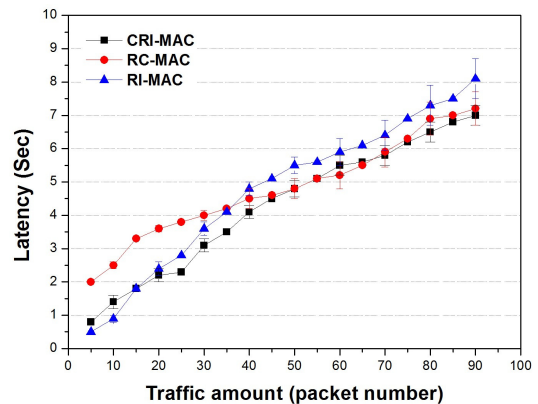


그림 13. 데이터 트래픽에 따른 전송 지연시간 비교
Fig. 13. Comparison results of latency according to traffic amount

V. 결론

무선 센서 네트워크에서는 노드들이 저전력으로 동

작될 수 있는 기법이 매우 중요시된다. 따라서 무선 센서 노드의 에너지 효율을 높이기 위해 많은 수신 노드 주도식의 MAC 프로토콜이 제안되었지만 잦은 충돌과 효율성이 낮은 충돌 해결 기법으로 인하여 에너지 효율과 전송 처리율 측면에서 높은 성능을 보이지 못했다. 이러한 무선 센서 노드들의 단점을 보완하기 위해 충돌 없는 전송을 위한 CRI-MAC을 제안하였다. CRI-MAC은 송신 노드들간의 전송 우선순위를 결정하고 패킷 충돌을 미연에 방지하여 노드의 수가 많을 수록 Idle Listening 구간을 없애 불필요한 에너지 소모를 보완하였다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 충돌확률, throughput, 에너지효율, 지연 시간 측면에서의 우수성을 검증하였다. 하지만, 가장 먼저 일어난 송신 노드가 가장 늦게 데이터 패킷을 전송하는 단점이 존재한다. 본 연구는 이에 대한 대처와 방안을 위해 각 노드의 가장 이상적인 송수신 처리 기법과 에너지 효율을 목표로 지속적인 연구를 진행할 계획이다.

References

[1] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. Mutka, and N. Xi, "The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: A survey," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 15, no. 1, pp. 101-120, First Quarter 2013.

[2] W. Ye, J. S. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. INFOCOM 2002*, pp. 1567-1576, Jun. 2002.

[3] T. Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. 1st ACM Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.*, pp. 171-180, Nov. 2003.

[4] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," in *Proc. 2nd ACM Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.*, pp. 95-107, Nov. 2004.

[5] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," in *Proc. ACM SENSYS 2006*, pp. 307-320, Oct. 2006.

[6] Y. Sun, O. Gurewitz, and B. D. Johnson,

"RI-MAC: A receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks," in *Proc. ACM SENSYS 2008*, pp. 1-14, Nov. 2008.

[7] P. Huang, C. Wang, L. Xiao, and H. Chen, "RC-MAC: A receiver-centric medium access control protocol for wireless sensor networks," in *Proc. 18th IWQoS 2010*, pp. 1-9, Jun. 2010.

[8] M. Habbal, "Bluetooth low energy-assessment within a competing wireless world," in *Proc. Wirel. Congress 2012-Systems & Applications*, 2012.

[9] J. S. Lee, Y. W. Su, and C. C. Shen, "A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi," in *IECON 2007*, pp. 46-51, Nov. 2007.

[10] Texas Instruments, *CC1310 Simple Link TMM Ultra-Low-Power Sub 1GHz Wireless MCU* (2015), Retrieved Sept., 10, 2016, from <http://www.ti.com/product/CC1310>

이 준 범 (Joonbeom Lee)



2017년 2월 : 서원대학교 정보통신공학과 졸업
 2017년 2월~현재 : 고려대학교 전기전자공학과 석사과정
 <관심분야> 센서네트워크, 이동통신, MAC, Drone, Localization

이 재 호 (Jaeho Lee)



2005년 : 고려대학교 전자컴퓨터공학과 석사
 2008년~2013년 : 고려대학교 전기전자전파공학과 박사
 2011년~2013년 : 서일대학교 겸임교수
 2013년~2015년 : LG전자 차세대표준연구소 선임연구원
 2015년~현재 : 서원대학교 정보통신공학과 조교수
 <관심분야> WPAN, 센서네트워크, MANET, MAC, WBAN, Bluetooth, Wi-Fi, ITS, Localization