

# 성능 향상을 위해 중간 노드를 이용한 개선된 수신자 주도의 MAC 프로토콜

공준익\*, 이재호<sup>o</sup>

## Receiver-Initiated MAC Protocol Using an Intermediate Node to Improve Performance

Joon-Ik Kong\*, Jaeho Lee<sup>o</sup>

요약

무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜에 관한 연구는 동기식 MAC 프로토콜과 비동기식 MAC 프로토콜로 구분되어 활발한 연구가 진행되어 왔다. 특히, 비동기식 MAC 프로토콜은 각 노드들이 독립적인 Duty Cycle로 동작하기 때문에 송수신자 간의 동기를 맞추기 위한 알고리즘 연구가 필수적이다. 대표적으로 수신자 주도의 (Receiver-Initiated) MAC 프로토콜은 각 노드가 Wakeup 하자마자 전송하는 Beacon을 이용하여 송수신자 간의 동기를 맞추는 알고리즘이다. 하지만, 송신자가 언제 전송될지 모르는 수신자의 Beacon을 기다리면서 불필요한 에너지 소모가 발생하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 송수신자 사이의 최적의 중간 노드를 선정하여 성능을 향상시키는 MAC 프로토콜을 제안한다. 시뮬레이션 결과는 기존의 알고리즘 보다 에너지 효율을 향상시키고 전송 지연 시간이 감소되는 결과를 보인다.

**Key Words** : Energy Efficiency, Intermediate Node, Receiver-Initiated MAC, Asynchronous MAC, WSN

ABSTRACT

The MAC protocols, which are classified into synchronous and asynchronous MAC protocol in the wireless sensor network, have actively studied. Especially, the asynchronous MAC protocol needs to research on the algorithm synchronizing between nodes, since each node independently operates in its own duty cycle. Typically, Receiver-Initiated MAC protocol is the algorithm synchronizing particular nodes by using beacon immediately transmitted by each node when it wakes up. However, the sender consumes unnecessary energy because it blankly waits until receiving the receiver's beacon, even if it does not know when the receiver's beacon is transmitted. In this paper, we propose the MAC protocol which can improve the performance by selecting an optimal node between a sender and a receiver to overcome the disadvantages. The simulation results show that the proposed algorithm improves energy efficiency and decreases average delay time than the conventional algorithm.

\* First Author : Telecommunications Technology Association, Software Testing & Certification Laboratory, joonik@tta.or.kr, 정회원  
<sup>o</sup> Corresponding Author : Seowon University, Department of Information and Communications Engineering, izeho@seowon.ac.kr, 정회원  
 논문번호 : KICS2016-07-148, Received July 13, 2016; Revised October 5, 2016; Accepted October 5, 2016

## I. 서 론

최근 고성능 스마트 기기의 보급과 사물 인터넷에 대한 높은 관심으로 WPAN (Wireless Personal Area Network) 기술이 각광을 받고 있다. 특히 무선 센서 네트워크는 다루기 쉽고, 값이 저렴하다는 장점으로 다양한 분야에서 사용되고 있다.

무선 센서 네트워크는 응용의 목적에 따라 다수의 센서 노드들이 하나의 네트워크를 구성하고, 사용자가 요구하는 정보를 수집한다. 이때, 구성된 네트워크를 오랫동안 유지하기 위해서는 가장 먼저 센서 노드의 에너지 소모에 대한 부분을 고려해야 한다. 대부분의 센서 노드들은 배터리로 운용되며, 그 배터리에 의존하여 네트워크 수명이 결정된다. 따라서 센서 노드의 제한된 자원들을 효율적으로 사용하고, 네트워크 수명을 연장시키기 위한 연구가 계속되고 있다.

무선 센서 네트워크에서 이웃한 센서 노드들과 서로 통신할 때 에너지 소모가 발생하는 원인은 Idle Listening, Overhearing, Collision, Control Packet Overhead로 구분할 수 있다. 이와 같은 요인들은 응용의 목적과 환경에 적합하도록 충분히 고려되어야 하며, 네트워크 수명을 연장할 수 있는 최적화된 MAC 프로토콜을 설계해야 한다.<sup>[1,2]</sup>

MAC 프로토콜은 Active 상태와 Sleep 상태가 주기적으로 반복하는 Duty Cycle의 동기 여부에 따라 동기식 MAC 프로토콜<sup>[3][4]</sup>과 비동기식 MAC 프로토콜로 구분한다. 동기식 MAC 프로토콜은 환경 모니터링 시스템과 같은 응용에서 주기적이고 빈번한 데이터 전송이 있을 때 적합한 방법이다. 앞서 언급한 에너지 소모의 4가지 관점으로 살펴보면, 동기식 MAC 프로토콜의 에너지 소모의 주된 원인은 각 노드들이 서로 동기를 맞추기 위해 주기적으로 Control Packet Overhead를 발생시키는 것이며, 나머지 요소는 약속된 시간에 데이터 전송이 이루어지기 때문에 에너지 소모를 최소화할 수 있다. 대조적으로 비동기식 MAC 프로토콜은 침입 탐지 시스템과 같은 데이터가 거의 발생하지 않는 응용에 적합한 방법이다. 이와 같은 응용은 전송할 데이터가 일정하게 발생하는 것이 아니기 때문에 노드들 간의 동기를 주기적으로 맞출 필요가 없다. 따라서 노드 간의 Control Packet Overhead를 없애 에너지 소모를 줄일 수 있는 반면 나머지 요인들에서 상대적으로 에너지 소모가 많이 발생한다.<sup>[5,6]</sup>

비동기식 MAC 프로토콜은 주변 노드들과 동기를 맞추지 않고 독립적인 Duty Cycle로 동작한다. 따라

서 통신을 위해 주변 노드들과 동기를 맞춰야 하는데 그 주체에 따라 크게 송신자 주도 (Sender-Initiated) 방식<sup>[7,8]</sup>과 수신자 주도 (Receiver-Initiated) 방식<sup>[9][10]</sup>으로 구분할 수 있다. 간략한 동기화 과정은 다음과 같다. 송신자 주도의 방식은 송신자가 수신자가 메시지를 수신할 때까지 프리앰블을 반복적으로 전송하는 프리앰블 샘플링 방식으로 송수신자 간의 동기를 맞추고, 수신자 주도의 방식은 데이터 발생 시 송신자가 Wakeup 상태로 대기 하고 있다가 수신자가 Wakeup 상태로 들어서자마자 보내는 Beacon을 통해 서로 간의 동기를 맞춘다.

이와 같은 관점에서 수신자 주도의 MAC 프로토콜은 송신자 주도의 MAC 프로토콜과 비교하여 프리앰블 샘플링으로 인한 채널 점유 시간을 없애고 처리율을 향상시키는 장점이 있는 반면, 언제 깨어날지 모르는 수신자의 Beacon을 수신하기 위해 무작정 기다리면서 발생하는 단점이 있다. 특히, Duty Cycle의 Sleep 상태가 오랫동안 지속되면 송신자는 데이터 전송을 위해 Wakeup 상태를 계속 유지 하면서 Idle Listening 및 Overhearing으로 인한 불필요한 에너지 소모가 발생하기 때문에 수신자의 Beacon에 의존하여 동기화 과정이 이루어지는 과정을 개선할 필요가 있다.

본 논문에서는 이러한 관점에서 송수신자 사이에 최적의 중간 노드를 선정하여 성능을 개선한 수신자 주도의 MAC 프로토콜을 제안한다. 이것은 송수신자 사이에 최적의 중간 노드를 선정하여 기존 알고리즘이 수신자의 Beacon에 의존하면서 발생하는 여러 가지 문제점들을 극복할 수 있다. 또한 이에 대한 결과로 에너지 소모 측면이나 전송 지연 측면에서 좋은 성능을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장은 무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜의 특징을 살펴보고, 3장은 본 논문에서 성능 향상을 위해 제안하는 개선된 수신자 기반의 MAC 프로토콜에 대한 설명을 한다. 4장은 제안된 알고리즘의 성능을 평가하고, 마지막 5장에서는 결론을 맺는다.

## II. 연구 배경

무선 센서 네트워크의 비동기식 MAC 프로토콜은 동기를 맞추는 주체에 따라 송신자 주도의 MAC 프로토콜과 수신자 주도의 MAC 프로토콜로 구분된다.

그림 1은 대표적인 송신자 주도의 MAC 프로토콜인 X-MAC<sup>[9]</sup>의 동작 구조를 설명한다. X-MAC은 송

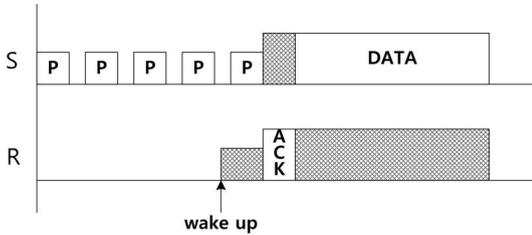


그림 1. X-MAC의 동작구조  
Fig. 1. X-MAC protocol

신자가 보낼 데이터가 있는 경우 수신자와 동기를 맞추기 위해 짧은 프리앰블을 반복적으로 전송하는 프리앰블 샘플링 방식으로 동작한다. 수신자는 송신자의 프리앰블을 수신한 즉시 Early-ACK를 전송하고, 송수신자 간의 데이터 교환이 시작된다. 프리앰블에는 목적지 주소를 포함해서 전송하기 때문에 자신의 주소와 일치하지 않는 노드들의 경우 Sleep 상태로 전환하여 자신의 에너지 소모를 최소화 한다. 하지만 상대방의 wakeup 상태를 알지 못하는 비동기식 MAC 프로토콜의 특징으로 최악의 경우 프리앰블 샘플링을 Duty Cycle 만큼 해야 하기 때문에 에너지 소모나 전송 지연 측면에서 단점이 있다. 또한 트래픽이 많이 발생하는 응용일 경우, 프리앰블 샘플링으로 인한 오버헤드와 에너지 소모가 증가할 수 있다.

그림 2는 대표적인 수신자 주도의 MAC 프로토콜인 RI-MAC<sup>[10]</sup>의 동작 구조를 설명한다. RI-MAC에서는 송신자가 데이터가 발생한 시점부터 Idle Listening 하면서 수신자의 Beacon을 기다린다. 수신자는 Wakeup 하자마자 자신의 Beacon을 전송하여 자신의 상태 변화를 주변에 알리고, 데이터 전송을 위해 기다리고 있던 송신자로부터 데이터를 수신한다. 이와 같은 방법은 앞서 설명한 프리앰블 샘플링 과정으로 소모되는 에너지 소모를 줄이고, 채널 점유의 원인이 되는 컨트롤 오버헤드를 줄이는 효과가 있다. 하지만, 다음과 같은 단점이 발생할 수 있다. 첫째, 이 알고리즘은 반드시 수신자의 Beacon을 수신해야만 데이터 전송이 이루어지기 때문에 오류가 발생한 수

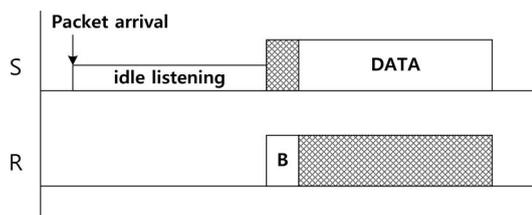


그림 2. RI-MAC의 동작구조  
Fig. 2. RI-MAC protocol

신자의 Beacon을 수신하거나 수신자가 깨어있음에도 해당 Beacon을 수신하지 못하면 다음 Beacon을 수신할 때까지 기다려야 한다. 둘째, 언제 전송될지 모르는 Beacon을 위해 송신자는 Wakeup 상태를 계속 유지해야하기 때문에 Idle Listening 및 Overhearing으로 인한 에너지 소모가 지속적으로 발생한다. 셋째, 오로지 수신자의 Beacon에 의존하여 동기화 과정이 이루어지기 때문에 hidden node 문제와 exposed node 문제가 발생할 수 있다. 마지막으로, 여러 개의 노드가 하나의 목적 노드로 데이터를 전송 할 경우 각 송신 노드들은 서로의 상태를 모르기 때문에 목적 노드의 Beacon을 수신함과 동시에 데이터 전송을 시도하기 때문에 Collision으로 인한 문제가 발생한다.

### III. 제안 알고리즘

#### 3.1 동작 과정

무선 센서 네트워크에서 대부분의 MAC 프로토콜은 에너지 효율을 향상시키기 위해 Wakeup 상태와 Sleep 상태가 주기적으로 반복되는 Duty Cycle로 동작한다. 비동기식 MAC 프로토콜에서는 각 노드별로 Duty Cycle이 독립적으로 동작하고, 이에 따라 송수신자 간의 데이터 전송을 위한 동기화 과정이 필수적이다. 제안 알고리즘에서는 송수신자 간의 동기를 맞추기 위해 요구되는 작은 크기의 컨트롤 패킷(Beacon, Request, ACK)을 다음과 같이 정의한다.

첫 번째로 Beacon은 기존의 RI-MAC과 동일하게 각 노드가 Wakeup 상태에 들어서자마자 Broadcast로 전송되며 자신의 상태를 주변에 알린다. 이 패킷에는 송신한 노드의 주소가 포함되어 있기 때문에 각 노드들은 주변에 위치한 노드들을 파악할 수 있고, 자신의 NT(Neighbor Table)에 저장하여 중간 노드 선출에 활용한다. 보통 센서 노드들은 한번 설치되면 움직이지 않고 일정한 Duty Cycle로 동작하기 때문에 시간이 지나더라도 노드들이 Wakeup 상태에서 수집하는 Beacon은 거의 동일하다.

두 번째로 Request는 RI-MAC에는 없는 새로운 컨트롤 패킷이며, 송신자가 전송할 데이터가 발생하면 즉시 Broadcast하는 작은 크기의 패킷이다. 이 패킷에는 데이터가 전송될 목적지의 주소, 송신자의 현재 Wakeup 상태의 종료 시간, 그리고 다음 주기의 Wakeup 상태의 시작 시간 등을 포함한다. 기존의 알고리즘에서는 데이터 전송을 대기하고 있던 송신자가 반드시 수신자의 Beacon을 수신한 후에 데이터 전송이 가능했지만, 이 패킷을 이용하면 송신자가 수신자

의 Beacon을 수신하지 않더라도 수신자가 Wakeup 상태라면 데이터 전송을 즉시 할 수 있다. 또 수신자가 Sleep 상태라면 수신자의 Beacon을 무작정 기다리며 불필요한 에너지를 소모하지 않고, 송수신자 사이의 중간 노드를 선정할 때 활용하여 송수신자 간의 어긋난 Duty Cycle로 인한 비효율을 보상할 수 있다. 따라서 이 패킷을 이용함으로써 각 노드는 정해진 Duty Cycle로 동작할 수 있고, 에너지 소모가 한 노드에게 집중되어 발생하는 네트워크 홀로 인한 네트워크의 수명 단축 문제를 방지할 수 있다.

마지막으로 ACK는 세 가지 기능이 있다. 첫째, 송신자가 Request를 전송했을 때 수신자가 Wakeup 상태라면 수신자는 ACK를 전송하여 즉시 데이터 전송이 이루어질 수 있도록 한다. 이로써 송신자는 수신자의 Beacon을 수신하지 않더라도 불필요한 대기 시간을 줄여 효율적으로 데이터를 전송할 수 있고 에너지 소모 및 전송 지연 시간을 최소화할 수 있다. 둘째, Request를 수신한 송신자 주변의 노드들 중 수신자의 주소가 자신의 NT에 저장되어 있는 노드들만이 ACK를 전송하고, 수신자의 주소가 자신의 NT에 저장되어 있지 않다면 이 패킷을 무시하여 불필요한 에너지 소모를 막는다. ACK를 전송하는 노드들은 중간 노드들이 되기 위한 후보 노드가 되며, 이 중 최적의 중간 노드를 선택하는 문제는 다음 절에서 설명한다. 중간 노드로 선택이 되면 송신자와 수신자의 중간에서 두 노드의 동기를 맞추는데 도움을 준다. 셋째, 송신자의 Beacon에 대한 응답으로 ACK를 전송한다. 송신자와 수신자 간의 Duty Cycle이 어긋나 Request를 수신자가 직접 받지 못했다면, 수신자는 중간 노드를 통해 송신자가 언제 Wakeup 할지 알 수 있기 때문에 송신자의 Wakeup 시간에 맞추어 대기하고 있다가 송신자의 Beacon을 받으면 ACK를 전송하고 데이터 전송을 시작한다. 이 과정은 수신자의 Duty Cycle에 맞추는 것이 아니라 송수신자간의 동기가 맞는 가장 빠른 시간에 데이터를 전송할 수 있어 전송 지연에 효과가 있다.

이와 같은 특징으로 제안 알고리즘은 앞장에서 언급한 RI-MAC의 단점을 극복할 수 있다. 첫째, 제안 알고리즘은 기존의 방법대로 수신자의 Beacon으로 데이터 전송이 가능할 뿐만 아니라 Request를 통해 오직 수신자의 Beacon에 의존하면서 발생되었던 문제들을 해결한다. 둘째, 송신자가 언제 전송될지 모르는 수신자의 Beacon을 기다리면서 Idle Listening 및 Overhearing으로 인해 소모되는 에너지를 최소화 한다. 수신자의 Beacon을 수신하지 않았더라도 수신자가 Wakeup 상태라면 Request를 통해 즉시 동기를 맞

출 수 있고, 수신자가 Sleep 상태라면 중간 노드를 이용해 동기를 맞추고 송신자는 불필요한 에너지를 소모하지 않고 자신의 Duty Cycle 대로 동작하여 에너지 소모를 최소화 한다. 셋째, hidden node 문제와 exposed node 문제는 앞서 정의한 컨트롤 패킷을 통해 해결할 수 있다. 마지막으로 여러 개의 송신 노드가 하나의 수신 노드로 데이터 전송을 시도할 경우는 다수의 송신자가 각자의 Request를 전송함으로써 서로의 경쟁 상대가 존재하는지의 여부를 알 수 있고, 나아가 스케줄링 기법을 통해 수신자는 연속적으로 송신자를 바꾸어가며 데이터를 수신할 수 있다.

그림 3은 각 상황에 따른 제안하는 알고리즘의 동작 과정을 설명한다. 첫째, 그림 3(a)와 같이 송신자가

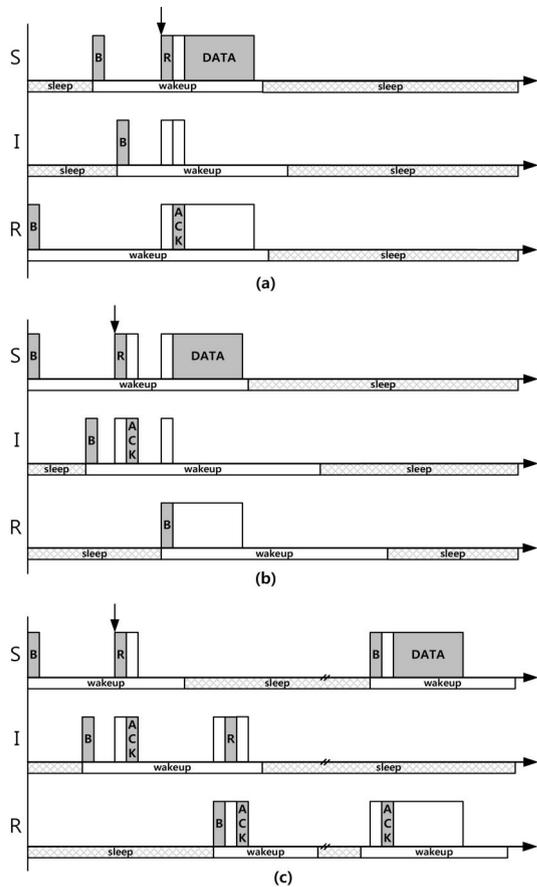


그림 3. 제안하는 알고리즘의 동작구조 (a) 수신자가 Request를 직접 수신 (b) 송신자의 wakeup 구간 내에서 수신자의 Beacon 수신 (c) 송신자의 wakeup 구간 밖에서 수신자의 Beacon 수신  
 Fig. 3. Receiver-Initiated Cooperation MAC Protocol (a) The receiver directly receives the request message (b) The receiver sends the beacon inside wakeup period of the sender (c) The receiver sends the beacon outside wakeup period of the sender

Request를 전송할 때 송신자보다 먼저 깨어있는 수신자가 직접 수신하는 경우이다. 이 경우 RI-MAC은 Request가 없기 때문에 송신자는 전송할 데이터가 발생하면 다음 주기에 발생하는 수신자의 Beacon을 수신할 때까지 기다려야 한다. 하지만 제안하는 알고리즘은 Wakeup 상태의 수신자가 Request를 직접 수신할 수 있기 때문에 곧바로 데이터를 주고받을 수 있다. 중간 노드는 송신자의 Request와 그에 대한 응답인 수신자의 ACK 모두 수신하기 때문에 아무런 일을 하지 않는다.

둘째, 그림 3(b)와 같이 송신자의 Request를 수신하지 못한 수신자가 뒤늦게 Beacon을 송신자의 현재 Wakeup 구간 내에 전송하는 경우이다. 이 경우에는 수신자의 Beacon을 송신자가 직접 수신하기 때문에 RI-MAC과 동일한 과정으로 데이터를 주고받는다. 중간 노드는 송신자의 Request에 포함되어 있는 송신자의 Wakeup 종료 시간을 알 수 있고 그 시간 안에 수신자의 Beacon이 송신자에게 전송되었다는 것을 파악할 수 있기 때문에 중간 노드 선출 과정이 더 이상 진행되지 않는다.

마지막으로, 그림 3(c)와 같이 송신자가 자신의 Wakeup 구간을 지나고 Sleep으로 들어갔을 때 수신자가 Beacon 보내는 경우이다. 이 경우에는 송신자는 수신자가 언제 깨어날지 모르므로 자신의 Wakeup 주기가 끝나면 바로 Sleep 모드로 전환하여 에너지를 절약하고, 알고리즘에 의해 선정된 최적의 중간 노드가 송신자의 역할을 위임받아 중개 역할을 한다. 중간 노드가 수신자의 Beacon을 수신하면 송신자의 Request를 전달하고, 수신자로부터 ACK를 수신한다. Request 안에는 송신자의 다음 Wakeup 주기의 시작 시간이 포함되어 있기 때문에 수신자는 송신자가 언제 깨어날지 알 수 있고, 송신자가 깨어날 때쯤 수신자가 미리 Wakeup 하여 송신자의 Beacon을 수신한다. 그리고 수신자는 Beacon에 대한 ACK를 송신하여 송수신기 간의 동기를 맞추고 데이터를 주고받는다. 이 과정은 RI-MAC과는 달리 수신자가 송신자의 Beacon을 이용해 동기를 맞추기 때문에 기존 보다 빠른 데이터 전송을 할 수 있고, 중간 노드의 도움으로 송수신자는 정해진 시간 이외에는 각각 Sleep 상태로 전환하여 에너지 효율을 증가시킬 수 있다.

### 3.2 최적의 중간 노드 선택

제안하는 알고리즘은 송수신자 사이에 최적의 중간 노드를 선택하고 활용하여 기존의 단점을 극복하고자 한다. 이때 중간 노드는 송수신자 간의 어긋난 Duty

Cycle의 동기를 맞추고, 효율적인 에너지 사용을 유도해 네트워크 수명을 연장하는데 중요한 역할을 한다. 최적의 중간 노드를 선택하기 위해서는 다음과 같은 내용을 고려해야 한다.

첫째, 송신자가 전송한 Request를 수신한 노드들 중 자신의 NT에 수신자의 정보가 담겨 있어야 한다. 가장 먼저 고려되어야 하는 것은 불특정 다수 노드를 고려하는 것을 지양하고, 송수신자 주변에 위치하고 있는 중간 노드의 후보들을 결정하는 것이다. 먼저 각 노드들은 주기적으로 전송되는 주변의 Beacon을 이용하여 자신의 NT를 유지하고 있다고 가정하였다. 중간 노드가 되기 위해서는 송신자의 Request를 수신한 노드들 중 Request 안에 포함되어 있는 수신자 주소가 자신의 NT에 존재하는지 여부를 판단해야 한다. 자신의 NT에 수신자의 정보가 담겨 있다면 송수신자 사이에 존재한다는 의미이고, 중간 노드의 최종 후보군이 된다.

둘째, 에너지 잔량이 많이 남아 있는 노드를 선택한다. 위의 과정에서 결정된 중간 노드 후보군 중에서 에너지 잔량이 많이 남아 있는 노드를 고려한다. 에너지 소모가 하나의 노드에 집중되면서 발생하는 네트워크 홉 문제를 방지하고 네트워크 부하를 분산시키는데 목적이 있다.

셋째, 최근에 Wakeup 상태로 들어선 노드를 선택한다. 중간 노드 후보군 중에서 Request 발생 시점을 기준으로 최근에 Wakeup 상태로 들어선 노드를 선택한다. 자제 결합이나 외부 환경 등과 같은 각종 변수들로 인해 센서 노드가 갑자기 중단되는 확률을 최소화하고 수신자와의 통신을 보다 원활히 할 수 있도록 한다.

앞서 언급한 요소들을 고려하여 최적의 중간 노드를 선출하기 위한 가중치 계산식을 다음과 같이 도출하였다.

$$w_i = \alpha \frac{E_{resi}}{E_{max}} + \beta \frac{1}{T_{SR} - T_{IB}}, (\alpha + \beta = 1, \alpha > 0, \beta > 0) \quad (1)$$

중간 노드의 후보군으로 선정된 노드들은 모두 식 (1)을 이용해 각자의 가중치를 계산한다. 첫 번째 항은 초기 에너지( $E_{max}$ ) 대비 에너지 잔량( $E_{res}$ )으로 현재 남아있는 에너지 잔량의 비율을 측정하고 에너지가 많이 남아 있는 노드에게 가중치를 부여한다. 두 번째 항은 송신자의 Request가 전송된 시간( $T_{SR}$ )과 중간 노드 후보가 깨어나 Beacon을 전송한 시간

( $T_{IB}$ )의 차를 역수 취하여 가장 최근에 깨어난 노드에 게 가중치를 부여한다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 weight factor이다. 결국 송신자는 각 중간 노드 후보들이 계산한 가중치 결과값( $\omega$ )을 비교하여 가장 큰 값을 갖는 노드를 최적의 중간 노드로 선정하고, 이렇게 선정된 중간 노드는 송수신자 간의 동기화 과정을 돕는다.

#### IV. 성능 평가

본 장에서는 제안하는 알고리즘의 성능을 측정하기 위해 시뮬레이션을 수행하고 이에 따른 결과를 분석한다. 센서 노드들은 랜덤하게 배치하고, 시뮬레이션이 끝날 때까지 움직이지 않도록 설정하였다. 다만, Duty Cycle의 주기 및 소스 노드의 수는 시뮬레이션 목적에 따라 변화시키며 측정하였다. 기본적인 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같이 설정하였다. 제안 알고리즘은 수신자 주도의 MAC 프로토콜인 RI-MAC 기반으로 동작하며 에너지 소모의 원인이었던 Idle Listening 및 Overhearing을 최소화한다. 따라서 제안 알고리즘의 성능을 비교 평가하기 위해 RI-MAC을 비교군으로 선택하고 에너지 소모 및 평균 전송 지연 시간에 대한 실험을 진행하였다.

무선 센서 네트워크에서는 네트워크의 단절과 같은 문제를 방지하기 위해 에너지 사용을 일부 센서 노드에 집중하지 않고 골고루 분산시켜 네트워크의 전체 수명을 연장하는 것이 중요하다. 그림 4는 센서 노드의 에너지 사용 분포를 확인하기 위해 데이터를 발생시키는 소스 노드를 랜덤하게 선택하고, 그 수를 변화시켜 일정 시간 동안 시뮬레이션 한 결과이다. 시간이 경과할수록 RI-MAC이 제안하는 알고리즘에 비해 동작하는 노드의 수가 급격히 줄어드는 것을 확인할 수

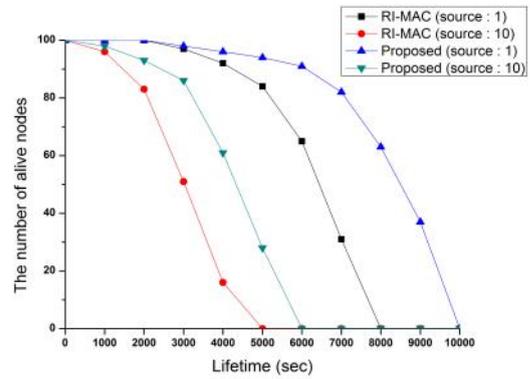


그림 4. 소스 노드의 수에 따른 네트워크 수명  
Fig. 4. Network lifetime depending on the number of source nodes

있다. 이는 RI-MAC이 송수신자 간의 동기화 과정 중에 송신자가 언제 올지 모르는 Beacon을 기다리면서 불필요한 에너지 소모가 집중되는 현상 때문으로 분석된다. 이 결과로 네트워크의 전체 수명이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 반면, 제안 알고리즘은 위의 경우와 달리 불필요한 에너지 소모를 막고, 에너지 잔량을 고려하여 중간 노드를 선택해서 상대적으로 에너지를 고르게 사용하기 때문에 결과적으로 네트워크 수명이 연장되었다고 분석할 수 있다.

RI-MAC에서 Duty Cycle이 길어지면 송신자가 Idle Listening 및 Overhearing으로 소모되는 에너지가 더욱 커진다. 최악의 경우 송신자는 데이터 전송을 위해 Duty Cycle의 한주기 동안 Wakeup 상태를 유지해야 한다. 그림 5는 Duty Cycle을 변화시키며 노드들의 평균 에너지 소모량을 측정하였다. Duty Cycle이 짧을 경우 두 알고리즘의 평균 에너지 소모에 대한 차이가 거의 없지만, Duty Cycle이 길어질 경우 두 알

표 1. 성능 분석을 위한 파라미터들  
Table 1. Simulation Parameters

Item	Value	
Data Packet Size	100 byte	
Power Consumption	Tx	28.9 mW
	Rx	15.2 mW
	Idle	8.7 mW
	Sleep	0.4 mW
Duty Cycle	Wakeup	40 %
	Sleep	60 %
Transmission Range	250 m	
Interference Range	500 m	

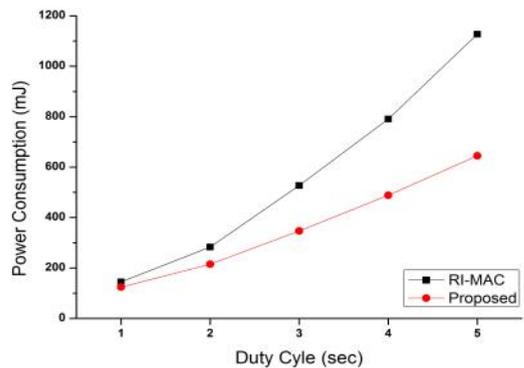


그림 5. Duty Cycle의 변화에 따른 에너지 소모량  
Fig. 5. Power Consumption vs. Duty Cycle

고리즘의 차이가 상당히 커지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 제안 알고리즘이 송수신자 사이에 중간 노드를 활용하기 때문에 Duty Cycle이 길어지더라도 송수신자 간의 동기화 과정에서 발생하는 불필요한 에너지 소모를 최소화한 결과로 분석된다.

그림 6은 Duty Cycle의 주기를 변화시키며 전송 지연시간을 측정하였다. RI-MAC에서는 송신자가 반드시 수신자의 Beacon을 수신해야 동기화가 되고 데이터를 전송할 수 있다. 송수신자가 모두 Wakeup 상태라 데이터 통신을 할 수 있는 상태라 할지라도 송신자가 수신자의 Beacon을 수신하지 못했다면 데이터 통신을 할 수 없고, 송신자는 다음 전송되는 Beacon을 기다려야 한다. 이와 같은 결과로 그림 6과 같이 Duty Cycle의 주기가 길어지면 송신자도 그만큼 수신자의 Beacon을 기다리는 시간이 늘어나기 때문에 평균 전송 지연시간이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 제안하는 알고리즘은 상대적으로 평균 전송 지연 시간이 효율적으로 나타났는데, 이는 Request를 이용해 수신자의 Beacon을 수신하지 못하더라도 송수신자가 모두 Wakeup 상태이면 바로 동기화시켜주거나, 중간 노드의 중재 역할로 수신자의 Duty Cycle이 아닌 송신자의 Duty Cycle로 동기화되어 보다 빠른 데이터 통신을 할 수 있기 때문으로 분석된다.

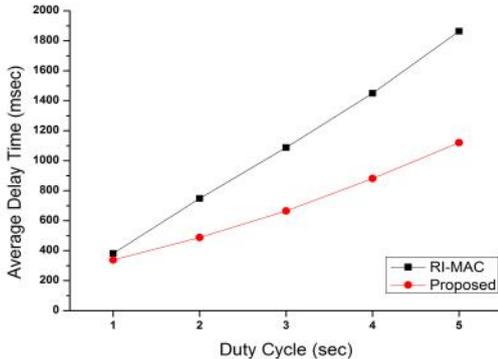


그림 6. Duty Cycle의 변화에 따른 평균 전송 지연시간  
Fig. 6. Average Delay Time vs. Duty Cycle

### V. 결론

무선 센서 네트워크에서 응용에 따라 에너지 효율이 높은 MAC 프로토콜을 선택하는 것이 중요하다. 특히, 데이터 발생이 거의 없는 응용은 동기화를 위해 주기적으로 에너지를 소모할 필요가 없기 때문에 비

동기식 MAC 프로토콜을 선택하는 것이 적합하다.

그러나 비동기식 MAC 프로토콜은 송수신자 간의 동기화 과정에서 수신자의 Beacon을 중심으로 동기화가 이루어지 때문에 Beacon을 수신하지 못하거나 Duty Cycle의 주기가 길어지면 단점이 발생한다. 언제 도착할지 모르는 Beacon에 대해 송신자 주도의 MAC 프로토콜에서는 반복적인 프리앰블 샘플링을 하고 수신자 주도의 MAC 프로토콜에서는 Idle Listening과 Overhearing으로 인한 에너지 소모이다. 특히, 수신자 주도의 MAC 프로토콜은 송신자 주도의 MAC 프로토콜과 비교하여 프리앰블 샘플링으로 인한 채널 점유 시간을 없애고, 처리율을 향상시키는 장점이 있지만 여전히 송신자가 Wakeup 상태를 계속 유지해야하기 때문에 에너지 효율이 좋지 않다.

본 논문에서는 기존의 문제점을 극복하고 기존 알고리즘의 성능을 향상시키는 개선된 수신자 주도의 MAC 프로토콜을 제안하였다. 그리고 여러 상황에서 중간 노드를 이용한 송수신자 간의 동기화 과정과 최적의 중간 노드를 선택하는 방법을 설명하였다. 이 과정을 통해 기존의 알고리즘과 비교하여 Idle Listening 및 Overhearing으로 인한 에너지 소모를 최소화하였고, 전송 지연 시간도 단축하는 실험 결과를 얻을 수 있었다.

### References

- [1] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, W. Mutka, and N. Xi, "The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: A survey," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 15, no. 1, First Quarter 2013.
- [2] X. Fafoutis, A. D. Mauro, M. D. Vithanage, and N. Dragoni, "Receiver-initiated medium access control protocols for wireless sensor networks," *Comput. Netw.*, vol. 76, pp. 55-74, Jan. 2015.
- [3] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. INFOCOM*, pp. 1567-1576, 2002.
- [4] T. van Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. SenSys*, pp. 171-180, Nov. 2003.
- [5] J. Kim, J. On, S. Kim, and J. Lee,

“Performance evaluation of synchronous and asynchronous MAC protocols for wireless sensor networks,” in *Proc. SENSORCOMM*, pp. 500-506, Aug. 2008.

- [6] J.-H. Lee, “A traffic-aware energy efficient scheme for WSN employing an adaptable wakeup period,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 71, no. 3, pp. 1879-1914, Aug. 2013.
- [7] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks,” *SenSys*, pp. 95-107, Baltimore, MD, USA, Nov. 2004.
- [8] A. E.-Hoiydi and J.-D. Decotignie, “WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks,” *ALGO SENSORS*, LNCS3121, pp. 18-31, 2004.
- [9] 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. Sensys*, pp. 307-320, 2006.
- [10] Y. Sun, O. Gurewitz, and D. B. Johnson, “RI-MAC: a receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks,” in *Proc. SenSys ACM*, pp. 1-14, Raleigh, NC, USA, Nov. 2008.

**공 준 익 (Joon-Ik Kong)**



2010년 : 고려대학교 전기전자  
전파공학과 석사  
2015년 : 고려대학교 전기전자  
전파공학과 박사  
2015년 4월~2016년 3월 : 목포  
대학교 정보산업연구소  
2016년 7월~현재 : 한국정보통신  
기술협회(TTA)

<관심분야> WSN, WBAN, Ad-hoc, Clustering

**이 재 호 (Jaeho Lee)**



2005년 : 고려대학교 전자컴퓨터  
공학 석사  
2008년~2013년 : 고려대학교  
전기전자전파공학과 박사  
2011년~2013년 : 서일대학교  
겸임교수  
2013년~2015년 : LG전자 차세대

대표준연구소 선임연구원  
2015년~현재 : 서원대학교 정보통신공학과 조교수  
<관심분야> WPAN, 센서네트워크, MANET, MAC,  
WBAN, Bluetooth, Wi-Fi, ITS, Localization