

# 무선 센서네트워크 환경에서 Duty Cycle 기반 동기식 및 비동기식 MAC 프로토콜의 에너지 성능과 지연시간에 대한 상호 분석\*

이재호\*\* · 엄두섭\*\*\*

## The Energy Performance Analysis Between Synchronous and Asynchronous Duty Cycle based MAC Protocols in Wireless Sensor Networks\*

Jae-Ho Lee\*\* · Doo-Seop Eom\*\*\*

### ■ Abstract ■

Recently, Wireless Sensor Networks (WSN) require energy performance and guaranteed delivery delay time, contrarily with previous MAC protocols that aim to high throughput mostly. In order to satisfy the new significant requirements, many MAC protocols of WSN employ and try to enhance the duty cycle mechanism which is energy efficient technique in MAC layer. This duty cycle mechanism is oriented by toggling the transceiver conditions composed of wakeup and sleep states. The synchronous MAC protocols perform the period synchronization process. Hence, these are energy efficient in periodic monitoring environment, but are inefficient in where an event is incurred rarely and infrequently. Otherwise, the performance of asynchronous MAC protocols are contrarily with synchronous protocols. In this paper, we design two models consisting Always-busy and Always-idle to simplify the general network congestion conditions. Through these models, moreover, we analyze two types MAC protocols in terms of energy efficiency and delay performance by analytical results. Additionally, we also evaluate two MAC protocols with two congestion models that we designed. By the analytical and simulated results, we provide the general and efficient decision method in which protocols are more appropriate in a certain WSN environment.

Keyword : MAC, Analysis of MAC, Duty Cycle, WSN, Wireless Sensor Networks

논문투고일 : 2011년 04월 21일      논문수정완료일 : 2011년 05월 07일      논문게재확정일 : 2011년 06월 10일

\* 본 연구는 민·군겸용기술사업(Dual Use Technology Program)의 지원을 받아 수행되었습니다.

\*\* 고려대학교 전기전자전파공학과 미래정보망 연구실, 주저자

\*\*\* 고려대학교 전기전자전파공학과 교수, 교신저자

## 1. 서론

최근 Wireless Personal Area Networks(WPAN) 분야가 유비쿼터스 발전과 함께 점진적으로 발전하고 있으며, 그 중, 무선 센서 네트워크 분야는 실생활에서의 필요성과 더불어 RFID와 함께 기술적 요구가 크게 증가하고 있다. 하지만 Wireless Local Area Networks(WLAN)[5], Wireless Wide Area Networks(WWAN)[6] 등의 기존 통신망이 높은 수율(throughput)을 요구하는 반면, 무선 센서 네트워크에서는 그 기술적 특성에 따라 시스템 요구사항 및 목표성능이 다르다.

무선 센서 네트워크는 현재 정부의 지속적인 관심 아래에서 꾸준히 연구되어 왔으며, 주요 시설물 관리, 야외 온도 및 습도정보 수집, 침입자 탐지 등과 같은 실험 및 시범 시스템이 센서 네트워크 기술 향상을 위하여 끊임없이 구축되어 왔다. 이와 같은 무선 센서 네트워크 서비스 환경은 데이터 발생량이 기존 통신망 대비 상대적으로 낮으며, 무엇보다도 단말장치의 소형화를 위한 요구사항이 증가하고 있다. 이러한 단말장치의 소형화는 내부 배터리 크기와 매우 밀접한 연관관계를 가지고 있으며, 이를 위해서는 통신장치의 저전력성이 가장 필요하다.

무선 센서 네트워크에서는, 시스템 목적에 적합한 응용 소프트웨어와 효율적인 네트워크 구성 및 관리를 위한 라우팅 알고리즘이 필요하며, 이들 모두와 독립적으로 에너지 효율이 높은 MAC 프로토콜이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 MAC 프로토콜에 대하여 기존 기술에 대한 분류와 이에 대한 환경적 특성을 고려하여 에너지 성능에 대한 분석을 기술하였다.

무선 센서네트워크의 MAC 프로토콜 중에서 가장 에너지효율이 높은 대표적인 방식은 Duty-Cycle이다. 이는 모든 노드가 sleep과 wakeup을 반복하여 수행하는 방식을 의미하며, 크게 동기식 [12, 14]과 비동기식[1, 7, 10]으로 구분된다.

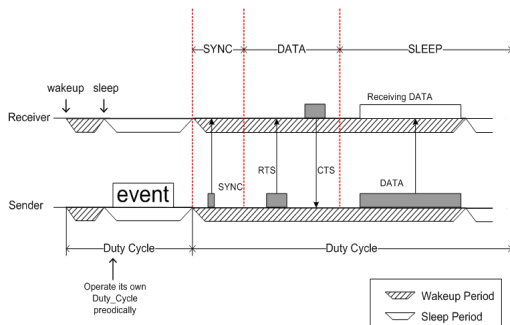
동기식 MAC 프로토콜은 노드 간 상호 wakeup

time과 Duty-Cycle period를 주기적으로 동기화시키는 방식을 의미하며 S-MAC[14], T-MAC[12] 등이 대표적이다.

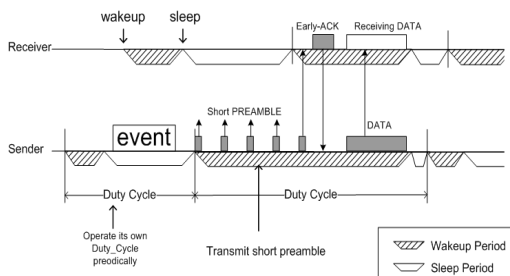
[그림 1]은 Duty-Cycle 기반의 대표적인 동기식 MAC 프로토콜 중 하나인 S-MAC[14]에 대한 동작 흐름도를 데이터 전송 관점에서 재해석하여 나타내었다. S-MAC은 각 노드가 자신의 이웃노드들과 wakeup time을 동기화하고, RTS/CTS를 통하여 각 노드가 데이터 전송 전에 채널을 예약함으로써 overhearing 문제를 해결하였다. 또한 T-MAC은 S-MAC에서의 wakeup time을 가변적으로 운영하여 에너지 효율을 높였다. 하지만 이러한 동기식 MAC 프로토콜 방식은 wakeup time 동기화로 인하여 최소 전송 지연시간을 보장하지만, 동기화를 위해 주기적으로 전송하는 control 프레임으로 인한 에너지 소모가 불필요하게 발생한다.

한편, 비동기식 MAC 프로토콜은 동기식에 비하여 주기적인 Control 프레임 전송을 수행하지 않기 때문에 에너지 효율 측면에서 유리하다. 또한 모든 노드는 자신만의 Duty-Cycle을 가지며 이를 토대로 주기적으로 sleep/wakeup을 반복하여 에너지 소모를 줄이고, 비컨(beacon) 전송, 시각동기 등의 동기식 메커니즘을 사용하지 않음으로써 불필요한 control 프레임 전송횟수를 줄였다. 하지만, 노드 간 wakeup time을 서로 알지 못하기 때문에 link당 최대 Duty-Cycle period 만큼의 전송 지연시간이 발생하게 된다.

무선 센서네트워크에서 현존하는 비동기식 MAC은 대표적으로 B-MAC[7], Wise-MAC[1], X-MAC[10] 등이 있다. B-MAC[7]은 기존 비동기식 MAC의 문제점을 보완하기 위하여, 실제 데이터를 전송하기 전에 프리앰블(preamble)을 우선 전송함으로써, 상대 노드의 wakeup time을 파악하기 때문에 실제 데이터의 재전송 횟수를 줄였다. B-MAC에서 발생하는 프리앰블의 에너지 소모량을 감소시키기 위해 제안된 Wise-MAC[1]은 이웃 노드의 wakeup time schedule을 학습하고, 이



[그림 1] S-MAC : Duty Cycle 기반 동기식 MAC



[그림 2] X-MAC : Duty Cycle 기반 비동기식 MAC

를 토대로 프리앰블 전송 시작 시간을 예측하기 때문에, 프리앰블 전송 시 발생하는 에너지 소모량을 줄이고 주기오차를 확률적으로 낮추었다.

[그림 2]는 Duty-Cycle 기반의 대표적인 비동기식 MAC 프로토콜 중 하나인 X-MAC[10]에 대한 동작 흐름도를 데이터 전송 관점에서 재해석하여 나타내었다. X-MAC은 기존 비동기식 B-MAC[7]과 Wise-MAC[1]을 근간으로 하는 MAC으로서, Short-Preamble과 Address Filtering, Early ACK를 사용하여 에너지 효율을 향상시켰다. Short-Preamble 방식은 B-MAC의 프리앰블 전송 방식을 짧게 나누어 여러 번 전송하는 방법으로, 프리앰블간의 송신 간격만큼 에너지 효율을 증가시켰으며, Address Filtering은 각 노드가 Short Preamble을 수신하기 위한 wakeup time을 줄이는 방법으로, Short Preamble에 목적지 주소를 포함시켜 수신중인 노드로 하여금 자신의 주소와 일치하지 않을 경우, 전체 프리앰블을 수신하지 않고 빠른 Sleep 상태로 진입하게 하여 에너지 소

모량을 최소화하였다. 마지막으로 Early ACK는 송신노드가 해당 수신노드의 Wakeup 상태를 미리 알고 프리앰블에 대한 ACK 전송 후 데이터 전송을 실시하는 방법으로써, 기존의 ACK 메커니즘과는 다른 방법을 사용하였다. 기존 Wise-MAC에서는 상대 노드의 Wakeup 상태를 파악하지 못하기 때문에 불필요한 데이터 재전송이 발생하였으나, X-MAC에서는 프리앰블 전송의 Early ACK를 이용하여 데이터 프레임의 ACK 대기 시간을 줄여 전송효율을 높이고 에너지 소모량을 감소시켰다.

그러나 이러한 X-MAC에서도 비동기식 MAC의 고질적인 문제인 전송 지연시간 문제를 해결하지 못했다. X-MAC을 포함한 대부분의 비동기식 MAC에서는 상대 수신노드의 wakeup 상태를 알지 못하기 때문에 전송해야 할 데이터가 링크당 최대 Duty-Cycle 크기만큼 전송 지연시간이 발생하며, 이는 침입 탐지나 감시경계 등의 센서네트워크 응용 서비스에서는 커다란 단점으로 남을 수 있다. 또한 트래픽이 많이 발생할 경우, 빈번한 프리앰블 샘플링으로 인하여 동기식보다 에너지 소모가 증가할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 Duty-Cycle 기반의 동기식과 비동기식 MAC 프로토콜의 장점과 단점을 에너지 측면에서 비교하기 위하여 두 가지의 네트워크 모델을 제시하고, 각 모델에서의 에너지 성능을 수학적 분석을 통하여 일반화 및 분석하였다. 또한 무선 센서네트워크에서의 지연시간 성능도 에너지 성능과 함께 분석하여 제시하였다.

## 2. 연구 배경

센서 네트워크 MAC 프로토콜에 대한 에너지 및 지연시간 성능에 대한 분석은 현재까지 활발히 진행되어 왔으며, 이에 따라 다양한 분석시점이 연구되고 있다[4, 8].

먼저 무선 센서 네트워크 환경에서 에너지 효율에 대한 비교분석 연구[4]에 따르면 센서 네트

워크 MAC 프로토콜은 기존 WLAN[5] 대비 요구 사항이 다르며, 이에 따른 MAC 프로토콜의 저전력성과 낮은 전송속도를 환경적 특징으로 나타내었다.

이 연구는 WLAN[5]이 데이터 전송에 대한 충돌을 회피하기 위하여 CSMA/CA를 활용하는 반면, 무선 센서 네트워크에서는 에너지 효율을 위하여 LPL(Low Power Listening) 기법을 활용한다는 결과를 나타내고, 이에 대한 효율성을 기존 CSMA/CA 기법과 비교하여 검증하였다. 또한 Duty-Cycle 기반의 대표적인 무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜인 S-MAC과 T-MAC에 대한 에너지 효율을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

하지만 이 두 가지 프로토콜은 모두 동기식 MAC 프로토콜이며, 비동기식 MAC 프로토콜에 대한 에너지 효율성 검증은 시도하지 않았다. 또한, 이 논문은 네트워크 혼잡도에 대한 고려를 하지 않았으며, 에너지 효율에 대한 수학적 분석을 나타내지 않았다.

무선 센서 네트워크 MAC 프로토콜의 동기식과 비동기식에 대한 성능분석[8]에 대한 연구는 앞서 소개된 논문의 단점을 충분히 보완하여 진행되었다. 이 논문에서는 동기식과 비동기식 MAC 프로토콜의 특징을 기술하고 장단점을 상호 비교하여 나타내었으며, 동기식 MAC 프로토콜의 대표적인 방식인 S-MAC, T-MAC과 비동기식 프로토콜의 대표적인 방식인 X-MAC, B-MAC에 대한 에너지 효율과 지연시간에 대한 성능을 수학적 분석을 통하여 평가하였다.

이 논문은 앞서 연구된 결과[4]에서 표현되지 못한 부분을 충분히 기술하였으나, 트래픽 발생에 대한 혼잡도 등에 대한 고려를 시도하지 않았다. 또한 이 논문에서는 분석시점을 단일 노드로 고정하였으며, 단일 Duty-Cycle 내의 Active Period에서 한 개의 데이터 packet만 발생한다는 가정을 전제로 분석하였다. 하지만, 실제 Duty-Cycle 방식에서는 단일 Active Period 내에서 여러 데이터 전송이 수행되며, 이는 Duty-Cycle 정책에 의해

서 결정되기 때문에, 트래픽 발생량이 높은 환경에서는 이러한 분석 방식이 현실성 측면에서 적합하지 않다.

이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 기존 분석모델에 대하여 3가지 고려사항을 추가하였다. 첫째, 단일 Duty-Cycle 내에서 복수의 데이터 전송이 가능한 환경을 모델화하여 현실적인 MAC 프로토콜 분석을 시도하였다. 둘째, 네트워크 트래픽 발생량이 높은 환경과 낮은 환경에서의 효과적인 분석을 위하여, 트래픽발생에 따른 네트워크 혼잡도를 두 가지 모델을 통하여 제시하였다. 마지막으로, 기존 센서 네트워크 MAC 프로토콜의 분석 기준이 단일 노드기준으로 시도되었지만, 본 논문에서는 이러한 제한된 분석을 탈피하기 위하여 local 네트워크 전체 노드에 시점을 두었다.

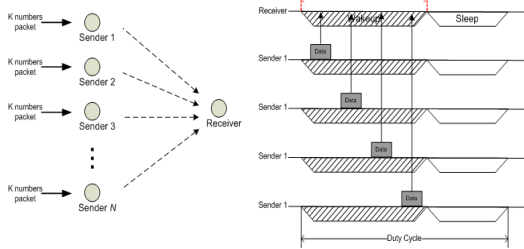
이러한 고려사항을 바탕으로, 본 논문에서는 위 두 모델에서의 동기식 및 비동기식 MAC 프로토콜에 대하여, 단일 노드가 아닌 전체 네트워크에서의 에너지 효율성 및 지연시간에 대한 수학적 비교결과를 제시하고, 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

### 3. 성능분석을 위한 네트워크 모델

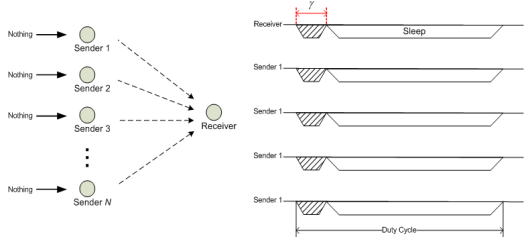
일반적으로 MAC 프로토콜은 주어진 환경에 따라 에너지 성능이 달라진다. 온도, 습도측정과 같은 주기적인 데이터 전송이 요구되는 환경에서는 동기식 MAC 프로토콜이 에너지 측면에서 효율적이고, 침입감시나 화재감시 등과 같이 평상시 데이터 전송이 발생하지 않는 환경에서는 비동기식 MAC 프로토콜이 에너지 측면에서 효율적이다.

이와 같이, 센서 네트워크 환경에서는 주어진 환경적 요인에 따라 에너지 효율이 달라지기 때문에, 각 MAC 프로토콜의 에너지 효율을 일반화하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 트래픽 발생률이 가장 높은 경우와 트래픽 발생률이 가장 낮은 경우에 대하여 각각 모델을 설정하였다.

[그림 3]과 [그림 4]는 이와 같은 상반된 환경에



[그림 3] Always-busy Model



[그림 4] Always-idle Model

대한 모델을 나타내었다. 이 두 가지 모델에서는 공통적으로 하나의 수신노드가 존재하고,  $N$ 개의 송신노드가 존재한다. 또한 모든 송신노드  $N$ 개는 수신노드를 포함하여 서로 동일한 전송 거리영역에 위치해 있으며, 어떠한 노드라도 자신을 제외한 모든 노드에게 간섭 등의 영향을 줄 수 있다. 실제 통신환경에서는 다수의 수신노드가 존재하지만, 이러한 통신환경을 단순화 하며 수신노드 단위로 에너지 성능을 분석하기 위하여 본 논문에서는 단일 수신노드 환경을 모델화한다. 또한 본 논문의 목적은 동기식 및 비동기식 MAC 프로토콜의 상호 성능분석이며, 따라서 수신노드 단위로 단순화한 모델을 통하여 동기식 프로토콜과 비동기식 프로토콜을 비교 분석 하였다.

[그림 3]은 실제 데이터 전송이 활발하게 일어나는 모델에 대한 설명이며, 본 논문에서는 이 모델을 Always-busy 이라고 명칭하고, 이를  $M_b$ 라고 표현하였다. 이 모델에서  $N$ 개의 송신노드는 모두 공통적으로  $k$ 개의 송신데이터를 가지고 있으며, 이때,  $k$ 개의 송신 데이터는 모두 동일한 데이터 크기를 갖는다. 즉, 모든  $N$ 개의 송신노드는 동일한

크기의  $k$ 개 데이터를 하나의 수신노드로 송신한다. 또한 본 모델에서의 지연시간 의미는, 모든 송신노드가  $k$ 개의 데이터를 성공적으로 완료한 시간까지를 가정한다. 본 Always-busy 모델은 1-hop 거리(수신 가능한 영역)에 있는 모든 노드들의 최대 혼잡상황을 모델화 한 것이며, 이에 따른 Duty-Cycle 기반의 동기식 및 비동기식 MAC 프로토콜 각각의 에너지 효율과 전송 지연시간을 분석하기 위하여 디자인 되었다.

[그림 4]는  $N$ 개의 송신노드가 아무런 데이터를 전송하지 않는 경우를 나타내었으며, 본 논문에서는 이 모델을 Always-idle이라고 명칭하고, 이를  $M_i$ 라고 표현하였다. 이 모델에서는  $N$ 개의 송신노드가 송신데이터를 보유하지 않으며, 따라서 Always-busy 모델과 상반적으로  $k$ 변수가 존재하지 않는다. 따라서 본 모델에서는 지연시간을 분석하지 않으며, 에너지 성능만을 분석한다.

Duty-Cycle 특성상 모든 노드는 wakeup period 상태에서만 송신 및 수신이 가능하며, sleep period 상태에서는 모든 송수신이 불가능하다. 일부 특정 Duty-Cycle 기반의 MAC 프로토콜에서는 ACK 수신을 위하여 wakeup period를 필요에 따라 연장시키지만, 이러한 경우는 동기식과 비동기식 성능비교에 동일한 영향을 미치므로, 본 성능분석에서는 wakeup period 연장 기능을 수행하지 않는 것으로 가정한다.

이러한 두 가지 상반된 네트워크 모델을 통하여, 본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서의 혼잡도가 클 경우와 매우 작을 경우를 기준으로 Duty-Cycle 기반의 동기식과 비동기식 MAC 프로토콜의 에너지 효율과 지연시간 성능을 일반화하여 비교 분석한다.

#### 4. 동기식 MAC 프로토콜 성능분석

본 장에서는 Duty-Cycle 기반의 동기식 MAC 프로토콜을 위 두 가지 네트워크 모델을 이용하여 에너지 효율과 전송 지연시간 성능을 분석한다.

동기식 MAC 프로토콜에서는 1-hop 범위 내에 존재하는 모든 송신노드와 수신노드의 Duty-Cycle이 주기적으로 동기화 되어, 송신노드는 수신노드의 wakeup time 정보를 보유하고 있다. 따라서 송신노드는 전송할 데이터가 발생할 경우, 수신노드의 wakeup 상태를 미리 파악한 후, 수신노드가 wakeup 상태이면 바로 송신하고, 반대의 경우에는 수신노드의 wakeup time까지 기다린 후, 송신한다. 즉, Always-busy 모델에서는  $N$ 개의 송신노드가  $k$ 개의 데이터 송신이 종료될 때 까지, 한꺼번에 송신을 시도한다. 이와 같은 이유로, 수신노드의 wakeup period 내에서는 최대 혼잡상태가 일어나고, sleep period 내에서는 데이터 전송이 발생하지 않는다.

일반적으로 동기식 MAC 프로토콜은 충돌회피를 위하여 CSMA/CA 등의 기법을 활용하며, 이에 따라 송신노드의 경쟁이 발생한다. 하지만 Duty-Cycle 기반의 센서 네트워크 MAC 프로토콜에서는 대부분 LPL(Low Power Listening) 방식을 적용하기 때문에 Carrier Sensing에 대한 에너지 소모가 매우 적으며, Carrier Sensing을 수행하지 않는 동기식 MAC 프로토콜 역시 존재하기 때문에, 본 논문에서는 LPL에 대한 에너지 소모를 고려하지 않는다. S-MAC, T-MAC의 경우 동기화가 발생할 경우에 수행되기 때문에, 이에 대한 에너지 소모는 동기화 에너지에 포함된다고 가정한다. 또한 하나의 wakeup period는 하나의 데이터 송신시간보다 크다고 가정한다.

Always-busy 모델에서 동기식 MAC 프로토콜의 에너지를 분석할 때, 전체 네트워크 내에서의  $n$ 번째 Duty-Cycle에 남아있는 잔여 패킷수를  $\delta_n$ 이라고 가정하면,  $\delta_n$  값은 식 (1)과 같다. 이때, 패킷 길이는  $l$ , wakeup period는  $\tau_w$ 라고 정의한다.

$$\delta_n = Nk - (n-1) \left\lfloor \frac{\tau_w}{l} \right\rfloor \quad (1)$$

또한, 단일 wakeup period 내에서 전송 가능한

패킷 수를  $\gamma$ 라고 정의하고 데이터 전송속도(transmit rate)를  $R$ 이라고 정의할 때,  $\gamma$ 값은 아래와 같다.

$$\gamma = \frac{R \cdot \tau_w}{l}, \quad (\gamma - \left\lfloor \frac{R \cdot \tau_w}{l} \right\rfloor \approx 0) \quad (2)$$

전체 네트워크 내에서 모든 데이터를 송신하기 위해서 필요한 수신노드의 Duty-Cycle 수를  $\beta$ 라고 정의할 때, 이 값은 식 (3)과 같다.

$$\beta = \left\lceil \frac{Mk}{\gamma} \right\rceil \quad (3)$$

한편,  $n$ 번째 Duty-Cycle에서의 에너지 소모량을  $E(n)$ 이라고 정의할 때, Always-busy 모델 내에서의 전체 에너지 소모량은 식 (3)의  $\beta$ 값을 이용하여 구할 수 있다. 즉, 각  $n$ 번째 에너지 소모량  $E(n)$ 을 필요 Duty-Cycle인  $\beta$ 값까지 구하여, 아래 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{syn, M_k} = \sum_{n=1}^{\beta} E(n) \quad (4)$$

여기서,  $n$ 번째 Duty-Cycle의 전체 노드의 에너지 소모량  $E(n)$ 은 하나의 수신노드와  $N$ 개의 송신노드 에너지 소모량의 합과 같고, 이는 아래 식 (5)와 같이 구할 수 있다. 이 때, 송신 에너지는 하나의 패킷을 전송하는데 소모되는 에너지를 뜻하고 이는  $E_t$ 라고 표현한다. 수신 에너지 역시 하나의 패킷 단위로 나타내고  $E_r$ 라고 표현하며,  $E_i$ 는 idle listening 에너지,  $E_s$ 는 sleep 에너지,  $E_c$ 는 동기화를 수행하는데 소모되는 에너지를 뜻한다. 또한,  $E_i$ ,  $E_s$ , 역시 한 패킷의 전송시간 단위로 표현된 값이다. 반면에  $\tau_c$ 는 동기화 수행의 시간간격을 뜻하며,  $\tau_c$ 와  $E_c$ 는 동기화 MAC 프로토콜에서만 발생하는 변수이다.

식 (5)는  $n$ 번째 Duty-Cycle에서 발생하는 송신노드와 수신노드의 총 에너지 소모량을 뜻한다.

이러한 결과를 이용하여 Always-busy 모델 내의 총 에너지 소모량을 구할 경우, 식 (4)에 적용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(n) &= (Receiving\ energy) + N(Transmitting\ energy) \\ &= \sum_{n=1}^{\gamma} E_r + E_s + \frac{E_c}{\tau_c} + \sum_{n=1}^{\gamma} \left( E_i + (\gamma-1)E_i + E_s + \frac{E_c}{\tau_c} \right) \\ &\quad + \sum_{n=\gamma+1}^N \left( E_i + E_s + \frac{E_c}{\tau_c} \right) \\ &= \gamma(E_r + E_i + (\gamma-2)E_i) + (N+1) \left( E_s + \frac{E_c}{\tau_c} \right) + E_i N \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E_{sym, M_k} &= \left( \frac{Nk}{\gamma} + 1 \right) \gamma (E_r + E_i + (\gamma-2)E_i) \quad (6) \\ &\quad + \left( \frac{Nk}{\gamma} + 1 \right) \left( (N+1) \left( E_s + \frac{E_c}{\tau_c} \right) + E_i N \right) \end{aligned}$$

위 식 (6)에서  $(Nk/\gamma+1)$  표현은 식 (3)에서 정의한  $\beta$ 변수가 가질 수 있는 최대 값을 적용한 형태이다. 식 (6)에서의 우변은 두 가지 항의 합으로 나타난다. 여기서, 첫 번째 항은  $\gamma$ 변수에 영향이 작지만, 두 번째 항은 에너지 소모량과  $\gamma$ 변수가 반비례적인 관계를 갖는다는 것을 나타낸다.

한편, 전송 지연시간 성능은 위 식을 이용하여 구할 수 있으며, 이는 아래와 같이 나타내어진다. 여기서  $\tau_d$  변수는 Duty-Cycle period를 의미하며, 식 (7)의 좌변은 Always-busy 모델 내에서 모든 데이터 송신이 완료되는 시간을 지연시간으로 간주하고 나타낸 것이다.

$$D_{sym, M_k} = \beta \cdot \tau_d = \left( \frac{Nk}{\gamma} + 1 \right) \tau_d \quad (7)$$

한편, [그림 4]와 같은 Always-idle 모델의 경우, 모든 송신노드는 송신 데이터가 없으며( $k = 0$ ), 따라서  $\beta$ 변수도 존재하지 않는다. 즉, Always-idle 모델에서는 송신 에너지와 수신 에너지가 없으며, 동기화 에너지와 idle listening 에너지, sleep 에너지만 존재하게 된다. 이 경우 에너지 소모량

의 측정시간을 위한 별도의 변수가 필요하게 되며, 본 모델에서는 이를 임의의 변수  $\alpha$ 라고 정의한다. 따라서 본 모델과 Always-busy 모델과의 차이점은 변수  $\beta$ 와 변수  $\alpha$ 의 차이가 발생할 뿐, 분석 방법은 동일하다.

Always-idle 모델의 에너지 소모량 역시 Always-busy 모델과 동일하게 분석할 수 있다. 즉, 이 모델에서도 전체 에너지 소모량은 각  $n$ 번째 Duty-Cycle에서의 에너지 소모량을  $\alpha$ 만큼 분석하여 얻을 수 있으며, 이는 식 (8)과 같이 구해진다.

$$E(n) = (N+1) \left( \gamma E_i + E_s + \frac{E_c}{\tau_c} \right) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} E_{sym, M_k} &= \sum_{n=1}^{\alpha} E(n) \\ &= \alpha(N+1) \left( \gamma E_i + E_s + \frac{E_c}{\tau_c} \right) \end{aligned}$$

이때, Always-idle 모델에서는 실제 송신 데이터가 없기 때문에 Always-busy 모델과 달리 전송 지연시간은 존재하지 않는다.

이와 같이, Always-busy 모델과 Always-idle 모델은 동일 네트워크에 트래픽이 최대로 발생하는 상황과 최소로 발생하는 상황을 나타내며, 이 두 모델을 통하여 본 논문에서는 Duty-Cycle 기반의 동기식 MAC 프로토콜의 에너지 효율과 지연시간 성능을 수식화 된 결과를 통하여 분석하였다.

## 5. 비동기식 MAC 프로토콜 성능 분석

비동기식 MAC 프로토콜은 동기식과 달리, 노드 간 동기화가 이루어지지 않기 때문에 송신노드가 수신노드의 wakeup time을 알지 못한다. 따라서 송신노드는 수신노드의 wakeup 상태를 확인하기 위해 프리앰블 샘플링(preamble sampling)을 수행하며, 이는 송신노드가 수신노드에

게 데이터를 송신하기 전에 프리앰블을 계속해서 전송하는 형태이다. 즉, 송신노드는 수신노드로부터 프리앰블에 대한 ACK 프레임을 수신하기 전까지 프리앰블을 연속 송신하며, ACK 프레임 수신 후에는 수신노드가 wakeup 상태에 진입했다는 사실이 확인되므로, 이때 실제 데이터를 송신한다.

비동기식 MAC 프로토콜에 대한 분석 역시 동기식 프로토콜과 동일한 방법을 통하여 이루어지며, 이 경우에도 위 두 가지 모델을 통하여 분석한다. 단, 동기식 프로토콜에서는 주기적인 동기화 에너지가 소모된다는 점에 반하여, 비동기식 프로토콜에서는 프리앰블 샘플링에 대한 에너지가 소모된다는 점이 유일한 차이점이다. 프리앰블 샘플링은 동기화와 달리 실제 데이터 송신이 일어날 경우에 한하여 발생하며, 이는 곧 비동기식 MAC 프로토콜이 화재감지나 침입감시 등의 이벤트가 거의 발생하지 않는 환경에서 더욱 효율적이라는 결과를 야기한다.

Always-busy 모델에서는  $N$ 개의 송신노드가 모두  $k$ 개의 데이터 전송 전에 프리앰블 전송을 시도하고, 동기화는 수행하지 않는다. 즉, 비동기식 프로토콜의 에너지 소모량은 동기식 에너지 소모량에서 동기화 에너지를 제거한 후, 프리앰블 샘플링 에너지를 추가한 형태로 나타내어지며, 이는 식 (9)와 같이 구해진다.

$$E_{asyn, M_b} = E_{syn, M_b} + \beta N \cdot E_{prm} - \frac{\beta(N+1)}{\tau_c} \cdot c \quad (9)$$

이때, 프리앰블 샘플링 에너지는  $E_{prm}$ 으로 나타내며, 각 변수  $\beta$ ,  $\tau_c$ ,  $N$ ,  $k$ ,  $E_c$ 는 제 4장에서의 동기식 에너지 소모량 분석에서 나타난 변수와 동일한 의미를 지닌다. 또한 동기식 프로토콜에서 동기화 에너지를 적용할 때  $(N+1)$ 을 적용한 점에 반하여, 비동기식 프로토콜에서 프리앰블 샘플링 에너지에  $N$ 을 적용한 점이 다른 이유는, 동기화는 송신노드와 수신노드가 모두 수행하는 데 반하여, 프리앰블 샘플링은 오직 송신노드만 수행하

기 때문이다. 또한, 프리앰블 샘플링은 수신노드가 wakeup period에 진입하기 전 수신노드의 sleep period 내에서만 송신노드에 의하여 수행되므로, 프리앰블 샘플링에 대한 에너지 소모량은  $k$ 변수가 아닌  $\beta$ 변수에 영향을 받는다. 즉, 수신노드가 wakeup 상태에 진입하면 데이터 송신 수와 관계없이 프리앰블 샘플링은 단 한번만 이루어지므로, 필요 Duty-Cycle 수인  $\beta$ 변수가  $E_{prm}$ 에 적용된다.

프리앰블 샘플링은 송신노드의 전송 시작 시간과 수신노드의 wakeup time간 시각 차이에 의존하여 에너지 소비량이 다르다. 따라서 이를 모든 상황을 고려하여 증명하기는 힘들며, 본 논문에서는 이에 대한 평균값을 나타내었다. 먼저 프리앰블 에너지는 프리앰블 전송 power와 전송 시간의 곱으로 나타낼 수 있으며, 이때 전송시간은 평균값을 이용하였다. 즉, 송신노드의 전송 power를  $P_{TX}$  라고 정의하면 프리앰블 에너지는 아래와 같이 나타내어진다.

$$E_{prm} = \frac{1}{2} P_{TX} \left( \tau_d - \frac{l}{R} \gamma \right) \quad (10)$$

Always-busy 모델에서의 비동기식 MAC 프로토콜의 전체 에너지 소모량은 식 (10)을 식 (9)에 대입하여 아래 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$E_{asyn, M_b} = E_{syn, M_b} + \frac{\beta N}{2} P_{TX} \left( \tau_d - \frac{l}{R} \gamma \right) - \frac{\beta(N+1)}{\tau_c} E_c \quad (11)$$

비동기식 프로토콜의 지연시간은 동기식과 동일한 형태로 구해진다. 이때 프리앰블 샘플링에 의한 지연시간이 발생 할 수 있지만, 이는 수신노드의 sleep period 구간에서만 발생하기 때문에, 결국 전체 지연시간이 프리앰블 샘플링으로 인하여 증가하지는 않는다. 또한 동기식 프로토콜에서의 동기화 수행 역시 wakeup period 내에 포함되기 때문에 식 (7)과 같이 지연시간을 증가시키지



않는다. 이러한 이유로 인하여 비동기식 프로토콜의 지연시간 성능은 동기식 프로토콜의 지연시간과 동일하게 나타나며, 결국 Always-busy 모델에서 비동기식 프로토콜의 전체 지연시간은 식 (7)과 동일하다.

Always-idle 모델에서의 비동기식 MAC 프로토콜의 에너지 성능을 분석할 경우, 제 4장에서 언급한 내용과 동일한 이유로  $\beta$ 변수 대신  $\alpha$ 변수를 사용한다. 즉,  $N$ 개의 송신노드들은 송신할 데이터를 보유하지 않기 때문에, 본 논문에서는  $\alpha$ 까지의 에너지 성능을 측정하며, 그 결과는 아래와 같다.

$$E_{asyn, M_i} = \sum_{n=1}^{\alpha} E(n) = \alpha(N+1)(\gamma E_i + E_s) \quad (12)$$

이 경우, 비동기식 프로토콜에서는 동기화가 이루어지지 않기 때문에( $E_c/\tau_c$ ) 만큼의 에너지가 절약된다. 즉, Always-idle 모델에서는 비동기식 프로토콜이 동기식에 비하여 에너지 측면에서 효율적이라는 사실을 증명한다.

전송 지연시간 역시 제 4장과 동일한 이유로 인하여, Always-idle 모델에서는 어떠한 데이터도 송신되지 않으며 오직 동기식 프로토콜에서의 동기화 프레임만 전송되기 때문에, 본 모델에서는

전송 지연시간을 나타내지 않는다.

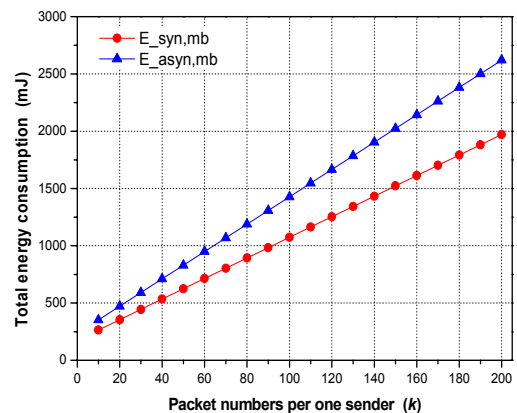
## 6. 성능결과 분석

본 장에서는 제 3장~제 5장에서 분석한 성능을 토대로 나타낸 결과를 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 시뮬레이션은 Network Simulator 2(NS-2)를 사용하였으며, 각 시뮬레이션 파라미터는 <표 1>과 같이 적용하였다. 또한 시뮬레이션 환경에서 에너지 소모량의 가장 큰 변수인  $N$ 과  $k$ 변수를 각각 변경하며 Always-busy 모델과 Always-idle 모델에서의 동기식 및 비동기식 MAC 프로토콜 성능을 분석하였다.

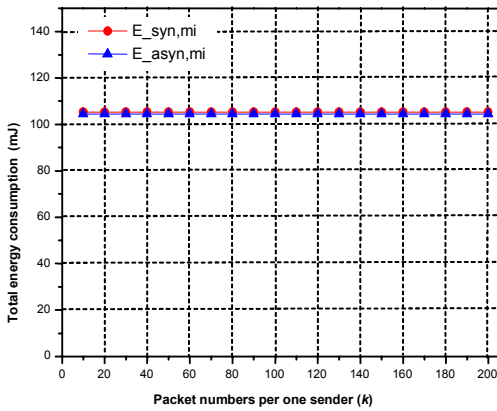
[그림 5]~[그림 7]은 각 모델별 데이터 전송 수를 나타내는  $k$ 변수를 증가시키며 결과를 측정하였다. 이 환경에서는  $k$ 변수만을 변화시키기 위하여  $N$ 값을 5로 설정하였다. [그림 5]는 Always-busy 모델에서의 동기식 및 비동기식 MAC 프로토콜의 전체 에너지 소모량을 나타낸다. 이 경우, 데이터 전송량이 많을수록 동기식 프로토콜이 비동기식에 비해 효율적임을 알 수 있다. 이는 비동기식 프로토콜이 각 Duty-Cycle마다 프리앰블 샘플링을 수행하기 때문에 나타나는 결과이며, 이 경우 동기식 프로토콜의 동기화 에너지보다 프리앰블 샘플링

<표 1> 성능분석을 위한 시뮬레이션 환경

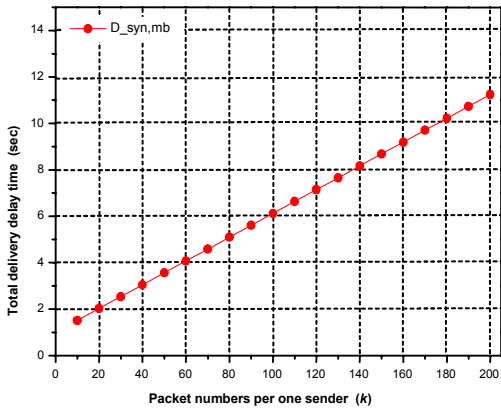
Parameters		Value
Duty_Cycle		1sec
RF Tx Rate		250kbps
Power Consumption	Rx	15.2mW
	Tx	28.9mW
	Idle	8.7mW
	Sleep	0.4mW
Synchronization interval		10sec
Data length		64byte
Wakeup period		0.2sec
Sleep period		0.8sec
$\alpha$ value in Mi model		10sec



[그림 5]  $k$ 변화에 따른  $M_b$  모델에서 동기식과 비동기식 프로토콜의 전체 에너지 소모량 측정결과



[그림 6]  $k$ 변화에 따른  $M_1$  모델에서 동기식과 비동기식 프로토콜의 전체 에너지 소모량 측정결과



[그림 7]  $k$ 변화에 따른  $M_0$  모델에서 동기식과 비동기식 프로토콜의 전송 지연시간 측정결과

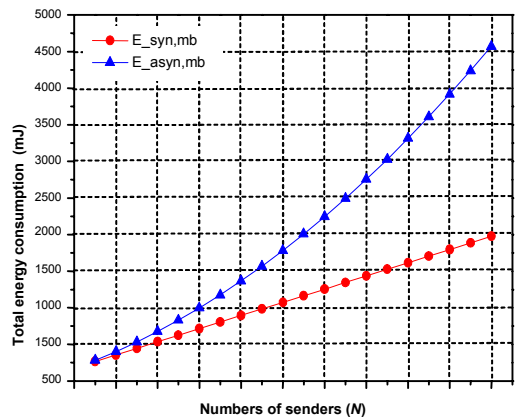
플링 에너지가 더 크다는 것을 알 수 있다.

[그림 6]에서는 Always-idle 모델에서의 동기식 및 비동기식 프로토콜의 에너지 소모량이 나타나어진다. 이 경우, [그림 5]와는 달리 비동기식 프로토콜이 동기식 프로토콜에 비하여 에너지 측면에서 효율적임을 알 수 있는데, 이는 동기식 프로토콜이 데이터 전송과 관계없이 동기화를 수행하는 반면 비동기식 프로토콜은 실제 데이터 전송이 있을 경우에만 프리앰블 샘플링을 수행하므로, Always-idle 모델에서는 비동기식 프로토콜

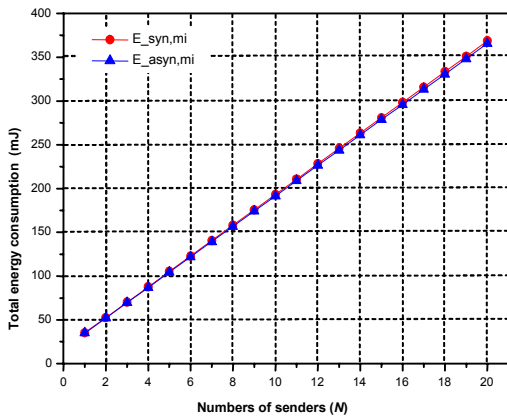
의 에너지 성능이 높다는 결과를 알 수 있다.

[그림 7]은 Always-busy 모델에서 동기식 프로토콜의 지연시간 성능을 측정한 결과를 나타내었다. 제 4장과 제 5장에서 설명한 바와 같이, 본 분석모델에서는 전체 데이터 송신이 완료되는 시점까지 지연시간을 측정하기 때문에 Always-idle 모델에서는 측정하지 않았으며, 또한 비동기식 프로토콜은 4장에서 설명한 바와 동일한 이유로 인하여 동기식과 동일한 결과를 갖는다.

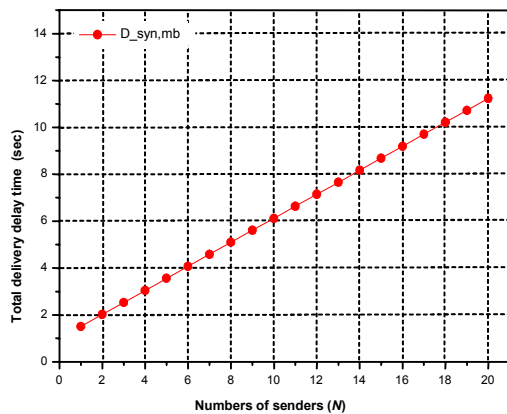
[그림 8]~[그림 10]은  $k$ 변수를 50으로 설정하고, 송신노드의 개수인  $N$ 변수를 증가하면서 두 가지 모델에서의 동기식 및 비동기식 프로토콜 성능을 측정한 결과이다. [그림 8]은 Always-busy 모델에서의 동기식 및 비동기식 MAC 프로토콜의 전체 에너지 소모량을 나타낸다. 이 경우, 송신노드 수가 많을수록 동기식 프로토콜이 비동기식 프로토콜에 비해 효율적임을 알 수 있다. 이는 [그림 5]에서의 이유와 동일하지만, [그림 8]이 [그림 5]에 비하여 그 차이가 더 크다는 것을 알 수 있다. 비동기식 프로토콜의 프리앰블 샘플링과 동기식 프로토콜의 동기화는 모두 노드 수에 비례하여 증가한다. 하지만 Always-busy 모델에서, 동기식 프로토콜은 단순히  $N$ 에 비례하여 동기화가 수행되지만, 비동기식 프로토콜은  $N\beta$ 에 모두 영향



[그림 8]  $N$ 변화에 따른  $M_0$  모델에서 동기식과 비동기식 프로토콜의 전체 에너지 소모량 측정결과



[그림 9]  $N$ 변화에 따른  $M_i$  모델에서 동기식과 비동기식 프로토콜의 전체 에너지 소모량 측정결과



[그림 10]  $N$ 변화에 따른  $M_b$  모델에서 동기식과 비동기식 프로토콜의 전송 지연시간 측정결과

을 받기 때문에 더욱 큰 차이가 발생한다.

[그림 9]는 Always-idle 모델에서의 에너지 소모량 차이를 보여준다. 이 결과는 비동기식 프로토콜이 동기식 프로토콜에 비하여 에너지 효율이 좋다는 사실은 알려준다. 하지만, [그림 9]는 [그림 6]과 달리 결과 형태가 다르다는 것을 알 수 있다. [그림 6]에서는 동기식과 비동기식의 효율만 다를 뿐  $k$ 값에 영향을 받지 않지만, [그림 9]에서는  $N$ 값에 비례적인 영향을 받는다. 이는 본 성능분석 모델에서 에너지 소모량은 전체 노드의 에너

지 소모량의 합을 의미하기 때문에, 결국 식 (8)과 식 (12)에 의하여  $N$ 이 증가하면 전체 에너지 소모량이 증가하게 된다. 즉, 송신노드가 증가할수록 각 노드가 소모하는 sleep, idle listening 등의 에너지 소모량이 증가하기 때문에 전체 에너지 소모량이 증가 [그림 10]은  $N$ 값의 증가에 따른 Always-busy 모델에서 동기식 프로토콜의 에너지 소모량을 나타낸다. 본 결과에서는 [그림 7]보다 높은 기울기가 관측되는데, 이는 본 시뮬레이션 환경에서  $k$ 변수(= 50)와  $N$ 변수(= 5)를 고정할 때, 그 값을 서로 다르게 설정하여 나타난 것이다. 보편적인 시뮬레이션 환경에서 노드 수 보다는 데이터 수를 더욱 가중시켜서 실험하기 때문에 본 성능평가에서도 두 변수의 고정된 값을 다르게 설정하였다. 즉, [그림 7]과 [그림 10]은  $Nk$ 에 의하여 나타나며, 두 경우 모두 각 시점에서의  $Nk$ 값이 다르기 때문에 기울기의 차이가 발생한다.

결과적으로 Duty-Cycle 방식의 동기식 MAC 프로토콜과 비동기식 프로토콜은 Always-busy 모델과 Always-idle 모델에서 서로 다른 결과를 나타내며, 이에 따라 서로 장단점을 보유한다. 이러한 이유로 MAC 프로토콜을 결정할 때에는, 응용 시스템에서 이벤트 데이터의 생성 빈도수를 파악하고 이에 대한 본 성능분석 결과를 적용하는 것이 가장 효율적인 방안을 예측할 수 있다.

## 7. 결 론

본 논문은 무선 센서 네트워크 환경에서 가장 에너지 효율이 높은 Duty-Cycle 방식 중, 동기식 MAC 프로토콜과 비동기식 MAC 프로토콜의 상호 성능 분석을 수식적 모델화를 통하여 기술하였다. 또한 두 가지 프로토콜의 장단점과 그 차이를 네트워크 혼잡 환경과 idle 환경으로 구분하여 일반화 하였다. 이러한 분석을 토대로 향후 센서 네트워크 환경에서는 사용 환경에 적합한 MAC 프로토콜을 올바르게 선택할 수 있으며, 이를 위한 정량적 수치도 도출이 가능할 것이다. 즉, 데이

터 전송에 대한 에너지 효율이 높은 동기식 프로토콜의 경우, 데이터 전송이 없어도 주기적인 동기화로 인한 에너지 소모가 발생하기 때문에, 온도측정, 강우량 측정 등의 주기성을 갖는 환경에서 효과가 높다. 또한 비동기식의 경우, 데이터 전송 시 프리앰블 샘플링으로 인한 에너지 소모가 발생하지만, 데이터 전송이 없을 때 주기적인 에너지 소모가 없다는 장점 때문에, 침입감시나 화재감시 등과 같이 평상시 데이터 전송이 거의 발생하지 않는 환경에 적합하다.

본 논문에서 분석된 센서 네트워크 환경에서의 동기식 및 비동기식 MAC 프로토콜에 대한 에너지 효율에 대한 결과는, 기존 연구에서 나타내지 못한 결과를 제시하였다. 즉, 본 연구는 1-hop 거리 내의 노드 전체에 대하여 트래픽 발생에 따른 비교결과를 도출하였으며, 이를 통하여 각 프로토콜별 오버헤드 크기가 도출되었다. 동기식에서의 동기화 오버헤드와 비동기식의 프리앰블 샘플링 오버헤드는, 앞서 제시된 두 가지 모델에 대하여 영향력이 서로 다르다는 것을 앞장에서 나타내었으며, 이를 토대로 응용환경에서의 요구 트래픽을 기준으로 어떠한 프로토콜이 효율적인지 정량적 예측이 가능하다.

최근 무선 센서 네트워크 환경에 적합한 새로운 MAC 프로토콜이 지속적으로 연구되고 있다. 센서 네트워크는 기존 통신망과 달리 에너지 효율이 최우선적으로 요구된다. 이를 위하여 새로운 MAC 프로토콜의 효율성을 파악할 때, 본 모델이 그 방향성에 대한 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Amre E.-H., J.-D. Decotignie, "WiseMAC : An Ultra Low Power MAC Protocol for Multi-hop Wireless Sensor Networks", *International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks ALGO SENSORS*, Lecture Notes in Computer Science, LNCS3121, (2004), pp.18-31.
- [2] Akyildiz, I. et al., "A Survey on Sensor Networks", *IEEE Communication Mag*, Vol.40, No.8(2002), pp.102-114.
- [3] Akyildiz, I., W. Su, Y. Sankarasubramanian, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks : A survey", *Computer Networks*, Vol.38, No.4(2002), pp.393-422.
- [4] Halkes, G. P., T. van Dam, and K. G. Langendoen, "Comparing Energy-Saving MAC Protocols for Wireless Sensor Networks", *Mobile Networks and Applications*, Vol.10, No.5(2005), pp.783-791.
- [5] IEEE 802.11 Standards, <http://www.ieee.org>.
- [6] IEEE 802.16 Standards, <http://www.ieee.org>.
- [7] Joseph, P., J. Hill, and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", *International Conference On Embedded Networked Sensor Systems SenSys*, (2004), pp.95-107.
- [8] Kim J., J. On, S. Kim, and J. Lee, "Performance Evaluation of Synchronous and Asynchronous MAC Protocols for Wireless Sensor Networks", *Proceeding SENSOR-COMM Proceedings of the 2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 2008.
- [9] Koucheryavy, Y., J. Harju, and V. B. Iversen, "A Random Backoff Algorithm for Wireless Sensor Networks", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.4003, pp.108-117, 2006.
- [10] Michael, B., G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC : A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks", *International Conference on Embedded Networked Sensor Systems SenSys*, (2006), pp.307-320.

- [11] Peng, L., C. Qiao, and X. Wang, "Medium Access Control With A Dynamic Duty cycle for sensor networks", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference WCNC*, (2004), pp.1534-1539.
- [12] Tijs, van D. and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *First International Conference On Embedded Networked Sensor Systems SenSys*, (2003), pp.171-180.
- [13] Xi, Z., J. Ansari, and P. Mahonen, "Traffic aware medium access control protocol for wireless sensor networks", *ACM international symposium on Mobility management and wireless access*, (2009), pp.26-27.
- [14] Ye, W., J. S. Heidemann, and E. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *IEEE Computer and Communications Societies INFOCOM*, (2002), pp.1567-1576.

## ◆ 저 자 소 개 ◆

**이 재 호** (izeho75@korea.ac.kr)

고려대학교 전자공학과 석사 수료후 현재 고려대학교 전자공학과 박사과 정중이며, 관심분야는 WPAN, 센서네트워크, MANET, MAC, WBAN 등 이다.

**엄 두 섭** (eomds@korea.ac.kr)

고려대학교 전자공학과 졸업 후 동 대학에서 전자공학과 석사수료 후 일 본 오사카대학 보통신공학과 박사과정 후 한국전자통신연구소 연구원과 원광대학교 전임강사 후 현재는 고려대 전기전자전파공학부 교수로 재직 중이며 관심분야는 통신네트워크 설계 및 성능분석, 무선 ATM, IP 네트 워크 등이다.