

EH-WSN에서 에너지 효율 향상 및 전송지연 축소를 위한 MAC 프로토콜 설계

(Design of MAC Protocol for Improving Energy Efficiency and Reducing Transmission Delay in EH-WSN)

박석우*, 나인호**

(Seok Woo Park, In-Ho Ra)

요약

최근의 에너지 하베스팅 무선 센서 네트워크에 대한 연구는 제한된 에너지 자원 문제를 해결하여 네트워크 수명을 효율적으로 연장시킬 수 있는 기술 개발에 집중되고 있다. 에너지 하베스팅 기술은 무선신호에 포함된 에너지를 이용하여 배터리를 충전 시킴으로써 네트워크 수명을 지속적으로 연장시킬 수 있는 장점을 지니고 있으나 에너지를 수확하는 시간 동안에는 데이터를 전송할 수 없기 때문에 에너지 수확량이 증가할수록 데이터 전송지연도 증가하는 문제점을 지니고 있다. 이에 따라 에너지 하베스팅 무선 센서 네트워크를 설계할 때에는 네트워크 수명 연장뿐만 아니라 전송지연 축소 문제를 모두 고려하여야 한다. 본 논문에서는 네트워크에 유입되는 트래픽 양과 수확되는 에너지양에 따라 데이터 전송에 필요한 에너지를 계산하고 패킷 데이터의 전송 시간을 조절함으로써 중단간 네트워크 지연을 최소화하는 MAC 프로토콜을 제안한다. 이를 위해 에너지 수확 시간을 측정하여 네트워크의 수면 시간을 조절하는 에너지 관리 메커니즘을 설계한다. 또한, 시뮬레이션을 이용한 성능평가를 통하여 기존의 MAC 프로토콜보다 에너지 소비량과 중단간 지연 측면에서 성능이 향상됨을 보인다.

■ 중심어 : 무선 센서 네트워크 ; 에너지 하베스팅 ; 에너지 수확 메커니즘 ; MAC 프로토콜

Abstract

Recent research on energy harvesting wireless sensor networks focuses on the development of techniques to solve the limited energy resource problem and to extend the whole network life efficiently. Energy harvesting technology can increase the lifetime of a network, but data transmission becomes unavailable when it harvests energy from radio frequency, resulting longer network delay with respect to the increased time in energy harvesting. Therefore, building energy harvesting wireless sensor network should consider the possible network delay as well as the network lifetime problem. In this paper, we propose a new MAC protocol that minimizes end-to-end network delay by adjusting the data transmission time for a packet based on estimating the energy for data transmission along with the amount of traffic flowing into the network and harvested energy. For this goal, it engineers an energy management mechanism that adjusts the sleep time of the network by measuring energy harvesting time. In addition, with simulation results it shows that the proposed MAC protocol improves the performance in terms of energy consumption and end-to-end delay, compared to the existing MAC protocols.

■ keywords : Wireless Sensor Network ; Energy Harvesting ; Energy Harvesting Mechanism ; MAC Protocol

I. 서론

최근, 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network, WSN)는 의료[1, 2, 3], 국방[4], 홈 네트워크[5], 스마트 오피스,

환경 모니터링[6, 7] 등과 같은 다양한 응용 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. WSN의 센서 노드는 크기가 매우 작기 때문에 별도의 에너지 공급 장치를 장착할 수 없어 내부에 설치된 소형 저전력 배터리로 작동된다. 그러나 센서 노드에 장착되는 배터리의 수명은 제한되어 있기 때문에 배터리를 주기적으로 교체하여야 하므로 교체에 따른 운영비용이 증가하게 되며, 접근 불

* 준회원, 군산대학교 전자정보공학부 정보통신전파공학전공

** 정회원, 군산대학교 컴퓨터정보통신공학부

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2016R1A2B4013002).

접수일자 : 2019년 04월 05일

게재확정일 : 2019년 05월 27일

수정일자 : 2019년 05월 27일

교신저자 : 나인호, e-mail : ihra@kunsan.ac.kr

가능한 지역에 센서 노드가 배치되는 경우에는 배터리 교체 자체가 불가능하다. 이에 따라 배터리 교체보다는 자체적으로 배터리의 수명을 최대한 연장하는 방법 즉, 배터리 소모를 최소화하는 네트워킹 기법과 무선신호로부터 에너지를 하베스팅(energy harvesting)하는 에너지 충전 기술을 적용하여 무선 센서 네트워크의 에너지 효율을 향상시킴으로서 궁극적으로 네트워크 전체의 수명이 연장될 수 있도록 하는 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[8, 9].

이와 관련하여 무선 센서 네트워크의 물리, 데이터 링크 및 네트워크 계층에서 에너지 하베스팅 기법과 에너지 효율적인 MAC(Media Access Control) 프로토콜을 적용하여 에너지 생산 및 소비를 최적화하는 방법을 선택할 수 있다. 특히 MAC 계층에서 네트워크 잔여 에너지량을 고려하여 채널 액세스, 패킷 전송 및 수신을 제어함으로써 에너지 효율을 크게 향상시킬 수 있다.

이미 알려진 바와 같이 에너지 하베스팅 기술은 태양[10], 진동, 바람[11], 전자기파 등과 같이 주변의 환경 에너지를 전기 에너지로 변환하여 무선 센서 네트워크의 제한된 배터리 문제를 해결할 수 있는 대안으로 주목 받고 있다. 한편 에너지 하베스팅 기술을 무선 센서 네트워크에 적용하기 위한 연구가 진행됨에 따라 기존의 MAC 프로토콜과는 다른 새로운 MAC 프로토콜의 개발에 요구 또한 증가하고 있는 실정이다. 새로운 MAC 프로토콜을 설계할 때에는 네트워크 내 센서 노드들의 에너지 하베스팅 시간(energy harvesting time), 전송 지연(transmission delay), 처리량(throughput) 등의 다양한 성능 기준을 고려하여 한다. 에너지 하베스팅 기반의 무선 센서 네트워크에서 충전 시간은 전체 네트워크 성능을 결정하는 매우 중요한 요소로서 충전 시간에 따라 서로 다른 네트워크 전송 지연이 발생하기 때문에 적절한 충전 시간을 확보할 수 있도록 제어하는 것이 중요하다. 즉 충전 시간이 길어지면 네트워크 지연이 증가하여 처리량이 감소한다. 이와 반대로 충전 시간을 짧게 하면 네트워크 전송 지연을 최소화하여 처리량을 증가시킬 수 있으나 네트워크 내 잔여 에너지량이 감소하여 네트워크 수명이 짧아진다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4를 기반으로 한 에너지 하베스팅 무선 센서 네트워크에서 실시간 트래픽 정보를 이용하여 에너지 충전 시간을 최적화하고 전송 지연을 최소화 할 수 있는 에너지 효율적 MAC 프로토콜을 설계한다.

IEEE 802.15.4의 Superframe 구조는 그림 1과 같다[12]. 여기서 Superframe은 활성 구간과 비활성 구간으로 이루어진다. 활성 구간은 16개의 슬롯으로 구성되며, 16개의 슬롯은 CAP(Contention Access Period)와 CFP(Contention Free Period)로 구분된다. 비컨과 비컨 사이를 비컨 길이(Beacon Interval, BI)로 나타내고 활성 구간을 Superframe 길이

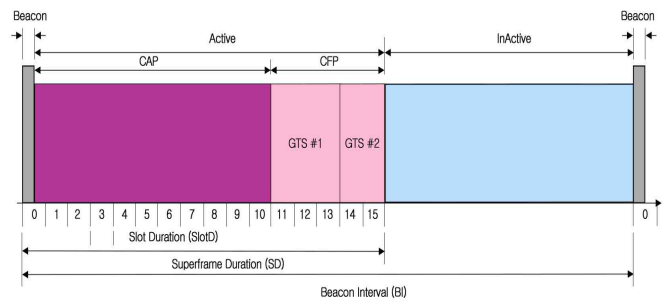


그림 1. IEEE 802.15.4 Superframe 구조 (Superframe Duration, SD)로 나타낸다. 비컨 길이와 Superframe 길이는 다음 수식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \quad (1)$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \quad (2)$$

여기서, BO는 $0 \leq BO \leq 14$ 의 값을 가질 수 있으며, SO는 $0 \leq SO \leq BO$ 의 값을 가질 수 있다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4의 Superframe을 이용하여 트래픽 양에 따라 SO 값을 조절하고 에너지 충전 시간에 따라 BO 값을 조절하는 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장과 3장에서는 각각 관련 연구 및 시스템 모델에 대해 기술한다. 4장에서는 제안된 MAC 알고리즘에 대해 상세히 기술하고 5장에서는 성능평가 수행 및 분석 결과에 대해 기술한다. 마지막으로 6장에서는 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

최근 IEEE 802.15.4의 Superframe의 의무 사이클(Duty Cycle)을 조절하여 무선 센서 네트워크의 에너지 효율 향상과 네트워크 수명 연장을 위한 MAC 프로토콜에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 논문 [13]에서는 상황에 따라 BO 값을 조절하여 네트워크의 수면 시간을 증감시킴으로 에너지 효율을 향상시키는 BOAA를 제시하였다. 논문 [14]는 Superframe의 SO값을 조절하여 네트워크의 트래픽 양에 따라 패킷 손실을 줄이고 에너지 효율을 향상시키는 DCA를 제시하고 있다. 논문 [15]는 코디네이터를 통해 충돌 속도 검사 및 CAP에서 CCA를 제어하여 에너지 소비를 최소화 시키는 기법을 제시하였다. 논문 [16]은 센서 노드의 대기 열(queue) 상태 및 트래픽 부하를 측정하여 의무 사이클(Duty Cycle)을 적응적으로 조절하여 에너지 소비를 향상시키면서 높은 QoS를 제공할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 논문 [17]은 RF 에너지 수확을 위해 RF 에너지를 수집하기 위한 수면 시간을 동적으로 조정하는 방법을 제시한 바 있으며, 제안된 RF-AASP 알고리즘을 통해 네트워크

경합 수준을 최소화하고 하베스팅 에너지를 최대화하여 에너지 효율 및 네트워크 처리량을 향상시킬 수 있도록 하였다. 논문 [13, 14, 15]에서는 BO(Beacon Order)값만을 이용하여 Duty Cycle을 조절하며, 논문 [16]에서는 트래픽 양을 이용하여 BO(Beacon Order)와 SO(Superframe Order) 값을 이용하여 Duty Cycle을 조절한다. 이러한 논문들은 에너지 하베스팅 기술을 이용한 MAC 프로토콜을 제시한 바 있으나 충전시간에 따른 전송 지연 증가 문제에 대해서는 고려하지 않고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 논문에서는 네트워크의 트래픽 유입량에 따라 Superframe의 SO를 조절함으로써 에너지 소비량을 최소화 하고 수확되는 에너지양에 따라 BO를 조절함으로써 네트워크의 지연을 최소화하는 MAC 프로토콜을 제안한다.

III. 시스템 모델

1. 수확된 에너지 관리 메커니즘

수확된 에너지 관리 메커니즘은 에너지 수확 기술을 적용하여 에너지 수확 시간과 데이터 전송시간을 결정하는데 있어 매우 중요한 역할을 수행한다. 센서 노드는 에너지 수확을 위해 비활성 구간을 가지며, 데이터 전송을 위해 활성 구간을 갖게 된다. 따라서 센서 노드는 에너지를 수집하는 동안 데이터를 전송하지 못한다. 이와 반대로 데이터를 전송을 하는 동안에는 에너지 수확을 할 수 없다. 또한 단위시간당 수확되는 에너지양은 주변 환경의 상태조건에 따라 서로 다르기 때문에 수확 가능한 시간과 수확양이 일정하지 않게 된다. 이에 따라 센서 노드는 에너지 수확과 데이터 전송을 위해 적절한 활성 구간과 비활성 구간을 가져야 한다.

본 논문에서는 에너지 잔여량과 임계 에너지에 따라 비활성 구간을 조정하는 기법을 제안한다. 수확된 에너지 관리 메커니즘의 수행절차는 논문 [18]에서도 연구된 바 있으며, 그림 2와 같다. 비활성 구간에서는 잔여 에너지와 임계 에너지에 따라 Superframe의 수면 시간을 결정된다.

그림 2에서 센서 노드의 잔여 에너지(E_r), 임계 에너지(E_{th}), 최대 에너지(E_{MAX}), 수면 시간(t_{sleep}) 그리고 잔여 에너지 및 임계 에너지에 따라 결정되는 1개의 부울(bool) 변수를 사용한다. 여기서 bool 변수의 값은 센서 노드가 데이터를 전송하는데 필요한 에너지를 보유하고 있는지 여부에 따라 결정되며, 이것은 센서 노드가 전송에 필요한 충분한 에너지를 수확하기 위해 어느 정도의 비활성 구간을 가져야 하는지를 결정하게 된다. 수면 시간(t_{sleep})은 전송 가능한 에너지 임계치에 도달하지 못했을 경우에 다음 식 (3)과 같이 에너지를 수확하는데 걸린 시

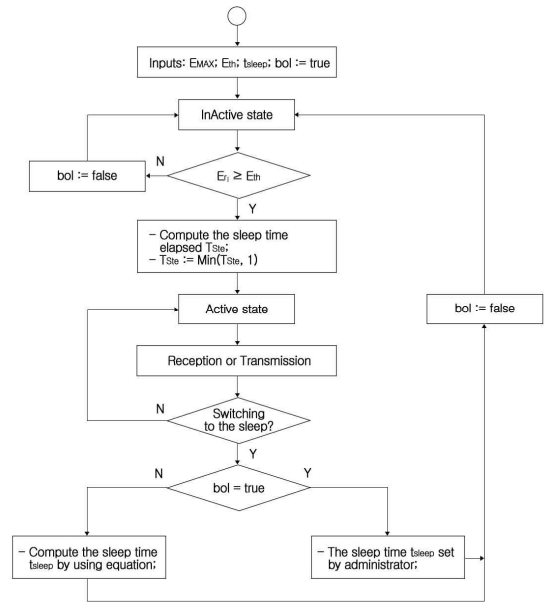


그림 2. 수확된 에너지 관리 메커니즘

간(T_{se})을 이용하여 계산한다.

$$t_{sleep} = \left(\frac{E_r - E_{MAX}}{E_{th} - E_{MAX}} \right) \times T_{se} \quad (3)$$

2. 에너지 소비 모델

에너지 소비를 모델링하기 위해서는 MAC 프로토콜의 설계 및 MAC 알고리즘과 관련된 무선 장치의 에너지 소비 모델이 요구된다. 센서 노드는 청취, 전송, 수신, 수면 모드와 같이 4 가지 상태 모드에서 에너지를 소비하게 되며 각각의 모드에서의 에너지 소비는 다음과 같다[19].

- 청취 에너지는 센서 노드가 청취할 때 사용된 에너지를 나타내며, 식 (4)에 의해 계산된다.

$$E_{listen} = (2 \times t_{CCA} + t_{idle}) I_{listen} U \quad (4)$$

여기서, t_{CCA} 는 송신이 시작되기 전에 두 개의 Backoff 슬롯에 대한 CCA(Clear Channel Assignment) 프로세스를 수행하여 채널 활동을 수행하는 시간이며, t_{idle} 는 센서 노드의 유휴 시간, I_{sleep} 는 청취 시 사용된 전류, U 는 배터리 전압이다.

- 전송 에너지(E_{tx})는 처음 전송 시 전송에 성공한 에너지(E_{txsuc})와 재전송 에너지($E_{retrans}$)에 의해 계산되며, 다음 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E_{tx} &= E_{txsuc} + E_{retrans} \\ E_{txsuc} &= t_{tx} I_{tx} U = \frac{L}{R} I_{tx} U \\ E_{retrans} &= N E_{txsuc} = N \frac{L}{R} I_{tx} U \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 t_{tx} 는 패킷 전송에 소모되는 시간, I_{tx} 는 전송에 사용되는 전류, N 은 재전송에 시도한 횟수이다. 패킷 전송에 소모되는 시간(t_{tx})는 패킷의 크기(L)와 데이터 속도(R)에 의해 구할 수 있다.

• 수신 에너지(E_{rx})는 식 (6)과 같이 계산되며, 패킷 수신시 소모되는 에너지이다.

$$E_{rx} = t_{rx} I_{rx} U = \frac{L}{R} I_{rx} U \quad (6)$$

여기서, t_{rx} 는 패킷 수신 시 소요되는 시간, I_{rx} 는 수신에 사용되는 전류이다.

• 수면 에너지(E_{sleep})는 식 (7)과 같이 계산되며, 센서 노드가 에너지를 수집하기 위해 사용되는 에너지이다.

$$E_{sleep} = t_{sleep} I_{sleep} U = (BI - SD) I_{sleep} U = (2^{BO-SO}) I_{sleep} U \quad (7)$$

여기서, t_{sleep} 는 센서 노드가 RF 에너지를 수집하는 시간, I_{sleep} 는 수면 모드에서 사용되는 전류이다. RF 에너지를 수집하는 시간은 비컨 길이(BI)와 Superframe 길이(SD)의 차이와 같으며, 비컨 길이와 Superframe 길이에 대해 2^{BO-SO} 로 나타낼 수 있다. 또한 RF 에너지를 수집하는 시간은 식 (3)에서 구한 값(t_{sleep})과 동일하다.

3. 서비스 품질(Quality of Service)

서비스 품질은 응용 프로그램의 패킷 손실(pl), 장치 간 지연(dl), 처리량(th)에 따라 결정되며, 이것은 장치의 전송 특성에 따라 서로 달라질 수 있다[20].

$$\begin{aligned} 0 < pl &\leq PL_{MAX} \\ 0 < dl &\leq DL_{MAX} \\ 0 < th &\leq TH_{MAX} \end{aligned} \quad (8)$$

다양한 응용프로그램에 따라 임계값이 다르므로 본 논문에서는 응용특성에 맞는 임계값을 이용하여 QoS를 측정한다.

IV. 제안된 MAC 알고리즘

1. 트래픽 부하 측정

네트워크 내에 전송되는 데이터의 양에 따라 네트워크 트래픽(Traffic) 상태 및 부하는 시시각각으로 변한다. PAN 코디네이터는 현재 들어오는 패킷의 수를 계산하여 트래픽 흐름을 추정하고 이전의 트래픽과 현재 들어오는 트래픽 양을 비교하여 트래픽 변화를 파악할 수 있다. $T^{[cur]}$ 은 현재 들어오는 트래픽

양을 나타내고 $T^{[pre]}$ 는 이전에 들어온 트래픽 양을 의미하며, $T^{[diff]}$ 는 현재 들어오는 트래픽 양과 이전에 들어온 트래픽 양의 차이를 나타낸다. 이러한 변수들을 이용하여 트래픽 양을 비교할 수 있으며, 식 (9)를 사용하여 트래픽 변화량에 따른 Superframe의 길이를 조정할 수 있다.

$$X_1 = \begin{cases} \left\lceil \log_2 \left(\frac{T^{[cur]}}{T^{[pre]}} \right) \right\rceil & \text{if } T^{[cur]} \geq T^{[pre]} \\ \left\lfloor \log_2 \left(\frac{T^{[cur]}}{T^{[pre]}} \right) \right\rfloor & \text{if } T^{[cur]} < T^{[pre]} \end{cases} \quad (9)$$

2. 에너지 수확 측정

센서 노드의 에너지 수확 환경과 수확량에 따라 최종 목적지 노드로의 데이터 전송에 소요되는 종단간 네트워크 지연이 달라진다. 수면 시간은 네트워크 지연에 큰 영향을 미치며, 제안된 알고리즘에서는 수확된 에너지 관리 메커니즘에서 계산된 수면 시간을 이용하여 Superframe의 비컨 길이(BI)를 조정함으로써 네트워크 지연을 최소화할 수 있도록 한다[16].

$$X_2 = \begin{cases} \left\lceil \log_2 \left(\left(\frac{E_r - E_{MAX}}{E_{th} - E_{MAX}} \right) T_{se} \right) \right\rceil & \text{if } E_r < E_{th} \\ \left\lfloor \log_2 (t_{sleep}) \right\rfloor & \text{if } E_r \geq E_{th} \end{cases} \quad (10)$$

이를 위해 식 (10)과 같이 노드의 수면 시간을 계산할 수 있는 RF 에너지 수확 측정 변수(X_2) 값을 이용하여 비컨의 길이(BI)를 조정한다.

3. 제안된 MAC 알고리즘

본 논문에서 제안한 MAC 프로토콜의 수행 절차는 다음의 알고리즘 1과 같다. 여기서 $t^{[d]}$ 는 인접한 두 개의 비컨에 대한 트래픽 부하의 최소 차이를 나타내고, 이것을 통하여 코디네이터는 트래픽 양을 예측할 수 있다. 또한 $t^{[c]}$ 는 현재 생성된 트래픽의 평균 합계를 나타내고 이것에 의해 트래픽 변동률을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 제안한 알고리즘에서는 에너지 수확량과 트래픽 양에 따라 비컨 길이(BI)와 Superframe 길이(SD) 결정하여 BO와 SO 값을 조정한다. X_1 과 X_2 는 각각 식 (9)과 식 (10)에 의해 계산한다.

BO와 SO 값을 각각 초기값 $BO^{[0]}$ 과 $SO^{[0]}$ 로 설정을 하고, E_r 과 E_{th} 값을 비교한다. 만약 잔여 에너지가 임계 에너지보다 작을 경우 에너지 관리 메커니즘을 이용하여 RF 에너지 수확 시간, 즉 수면 시간을 계산한다. 이후 수면 시간을 이용하여 X_2 값을 계산하고 $T^{[diff]}$ 값과 $t^{[d]}$ 값을 비교한다. 만약

$T^{diff} \leq t^{[d]}$ 를 만족하면 트래픽에 변화가 없고 T^{diff} 가 $t^{[c]}$ 이면 트래픽 로드가 낮다. 따라서 SO값은 줄이고 BO값은 수확된 에너지 관리 메커니즘을 통해 계산된 수면 시간에 따라 재설정되어야 한다. 만약 T^{diff} 가 $t^{[c]}$ 보다 높은 경우에는 트래픽 로드가 높아지기 때문에 SO 값을 증가시켜 충돌을 예방하여야 한다.

Algorithm 1: 제안된 EH-WSN MAC 프로토콜 수행 알고리즘

```

1: Initialize:  $BO^{[0]}$  and  $SO^{[0]}$ .
2: Energy threshold:  $E_{th}$ .
3: repeat
4: At the  $B^{th}$  BI: calculating  $T^{[cur]}$ ,  $T^{diff}$ ,  $E_r$ ,  $E_{th}$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ .
6: if ( $E_r < E_{th}$ ) then
7:   if ( $T^{diff} \leq t^{[d]}$ ) then
8:     if ( $T^{diff} \leq t^{[c]}$ ) then
9:        $SO^{[B]} := SO^{[B-1]} + X_1$ ;  $BO^{[B]} := BO^{[B-1]} + X_2$ 
10:      else
11:        if ( $QoS = False$ ) then
12:           $SO^{[B]} := SO^{[B-1]} + X_1$ ;  $BO^{[B]} := BO^{[B-1]}$ 
13:        end if
14:      end if
15:    else
16:      if ( $QoS = True$ ) then
17:         $SO^{[B]} := SO^{[B-1]}$ ;  $BO^{[B]} := SO^{[B]} + X_2$ 
18:      else
19:         $SO^{[B]} := SO^{[B-1]} + X_1$ ;  $BO^{[B]} := SO^{[B]} + 1$ 
20:      end if
21:    end if
22:  end if
23:  if ( $BO^{[B]} = 14$ ) || ( $BO^{[B]} \leq 2$ ) then
24:    if ( $SO^{[B]} = 11$ ) || ( $SO^{[B]} = 1$ ) then
25:      if ( $BO^{[B]} - SO^{[B]} > 9$ ) || ( $BO^{[B]} \leq SO^{[B]}$ ) then
26:        Set :  $BO^{[B]} := BO^{[0]}$ ;  $SO^{[B]} := SO^{[0]}$ 
27:      end if
28:    end if
29:  end if
30: until Finishing the simulation.

```

한편, T^{diff} 가 $t^{[c]}$ 보다 크면 트래픽에 변화가 있음을 의미한다. 따라서 코디네이터는 트래픽의 흐름에 따라 BO 및 SO 값을 조정한다. 이것은 제안된 알고리즘을 사용하면 에너지 수확에 따라 Duty Cycle을 효율적으로 조정하여 에너지 사용 효율을 향상시킬 수 있음을 의미한다.

V. 시뮬레이션 및 성능 평가

5장에서는 처리량, 지연, 에너지 효율 측면에서 제안된 MAC 프로토콜의 성능평가 수행환경 및 방안에 대해 설명하고 제안된 MAC 프로토콜과 기 제안된 ABSD, RF-AASP 프로토콜과의 성능을 비교분석한 결과를 기술한다.

표 1. 시뮬레이션 매개변수

	Parameter	Symbol	Value
PHY	Data rate (Kbps)	R	250
	Frequency (GHz)	f	2.4
MAC	No. of Retransmissions	N_{max}	3
	No. of Beacon Intervals	B	5
Applica tion	Packet arrival time (s)	λ	0.25-2
	Traffic (packet/s)	λ^{-1}	
	Packet size (bits)	L	1,024
	Receive (mA)	I_{rx}	19.7
Sensor	Transmission (mA)	I_{tx}	17.4
	Idle Listening (mA)	I_{listen}	0.02
	Sleep (mA)	I_{sleep}	0.001
	Voltage (V)	U	3
	Packet lossed (%)	PL_{max}	5
	QoS	Delay (s)	DL_{max}
Battery	Throughput (Kbps)	TH_{max}	10
	Initial Energy(J)	E_{MAX}	25,920
	Threshold	$E_{MAX} \times 80\%$	20,736

성능평가를 위한 시뮬레이션 시나리오를 구성하기 위해 본 논문에서는 6개의 센서 노드를 지원하는 PAN 코디네이터로 구성된 스타 토폴로지 기반의 IEEE 802.15.4 네트워크를 사용하고 네트워크 시뮬레이션을 수행하기 위해 Matlab을 사용한다. Matlab 시뮬레이터에서 사용된 시뮬레이션 파라미터는 [표 1]과 같다. 각 노드는 코디네이터로부터 10m 거리 내에 무작위로 배치되며, 데이터 속도는 250Kbps, 주파수 대역은 2.4GHz에서 작동된다. 에너지 수확량은 실제 상황에서 수확 가능한 범위 안에서 임의의 값을 사용한다.

본 논문에서는 제안된 MAC 프로토콜 및 알고리즘의 성능을 시뮬레이션하기 위해 평균 에너지 소비량, 평균 종단 간 지연, 평균 처리량을 성능 평가 기준으로 한다. 여기서 평균 에너지 소비량(Average Energy Consumption)은 데이터 전송 시 센서 노드의 잔여 에너지에 의해 각 상태에서 소비된 에너지의 총합으로 정의한다. 그리고 평균 종단 간 지연 (Average End to End Delay)은 센서 노드가 데이터 패킷을 전송한 시점부터 데이터를 수신한 시점 간의 차이로 정의한다. 마지막으로 평균 처리량 (Average Throughput)은 초당 비트 수(bps)로 측정되거나 경우에 따라 초당 데이터 패킷으로 측정되며 네트워크상의 한 지점에서 다른 지점으로의 성공적인 패킷 전달 수준으로 정의한다.

그림 3은 센서 노드의 평균 에너지 소비량 측면에서 제안된 기법과 기 제안된 기법들과의 성능을 비교한 결과를 나타낸 것이다. ABSD 기법은 에너지 효율을 향상시키기 위해 현재 트래픽과 이전 트래픽 양을 이용하여 BO와 SO 값을 적응적으로 조정하는 방식으로 에너지 수확 환경과 수확량을 고려하지 않

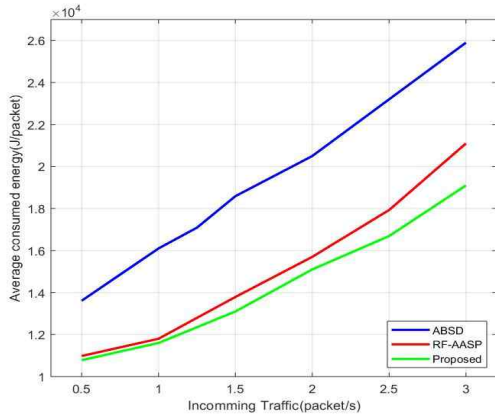


그림 3. 트래픽에 따른 평균 에너지 소비량

고 오직 트래픽 양에 따라 Duty Cycle을 조정하기 때문에 제안된 기법보다 더 많은 양의 에너지 소비를 함을 알 수 있다. 이것에 비해 RF-AASP 알고리즘의 경우, 에너지 수확량과 트래픽 양을 이용하여 BO와 SO 값을 동일한 값으로 증감하여 Duty Cycle을 조정함으로써 ABSD 알고리즘보다 에너지 소비량 측면에서 보다 적은 에너지를 소비하는 것을 알 수 있다. 반면 제안된 알고리즘의 경우에는 트래픽 양에 따라 BO값과 SO값을 각각의 변수 값에 따라 서로 다르게 증감함으로써 보다 효율적으로 에너지를 소비하는 것을 볼 수 있다. 실험 결과, 본 논문에서 제안된 알고리즘을 사용하면 네트워크 전체의 에너지 소비량이 ABSD 알고리즘 보다 약 27% 감소하고 RF-AASP 알고리즘 보다 약 10% 감소함을 알 수 있다.

그림 4는 트래픽에 따른 종단 간 평균 지연을 분석한 결과이다. ABSD 알고리즘의 경우는 에너지 수확량을 고려하지 않고 트래픽양만을 이용하여 BO 값을 일정한 수준으로 증감시키기 때문에 평균 지연 시간이 낮게 나타난다. 이에 비해 RF-AASP 알고리즘은 ABSD 알고리즘에 비해 평균 지연 시간이 매우 높다. 제안된 알고리즘의 경우 트래픽 양과 에너지 수확량을 모두 고려하여 BO 및 SO 값을 증감시켜 에너지 수확 시간과 비례하여 수면 시간을 조정하기 때문에 ABSD 알고리즘 보다는 높지만 RF-AASP 알고리즘에 비해서는 낮은 지연 시간을 갖는다. 성능 분석 결과 제안된 알고리즘을 사용하면 RF-AASP 보다 평균 종단 간 지연이 약 7% 감소됨을 보이고 있다.

그림 5는 트래픽 부하 변화에 따른 평균 처리량을 분석한 결과를 보인 것이다. ABSD 알고리즘은 현재의 트래픽 상태만을 고려하여 SO값을 조정하기 때문에 처리량이 가장 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. RF-AASP 알고리즘의 경우 트래픽 양과 에너지 수확 양에 따라 보다 큰 변수 값을 사용하여 SO 값을 증가시킴으로써 충돌 수준을 감소시키기 때문에 처리량이 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 본 논문에서 제안된 알고리즘의 경우 ABSD 알고리즘보다 4% 정도 처리량이 증가하고

RF-AASP 알고리즘보다 6% 감소함을 보이고 있다. 이것은 제안된 알고리즘의 처리량이 ABSD 알고리즘 보다 높고 RF-AASP 알고리즘보다는 낮다는 것을 의미한다.

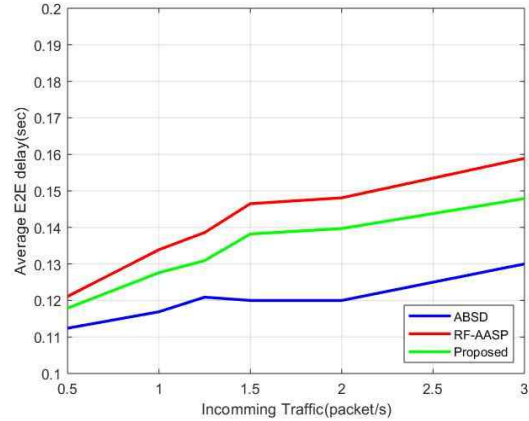


그림 4. 트래픽에 따른 평균 종단 간 지연

본 논문에서는 에너지 수확 기술을 이용하여 주변의 환경 에너지를 수확하고 트래픽 양에 따라 에너지를 효율적으로 조정하는 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션을 통한 성능평가 결과를 통해 제안된 알고리즘은 에너지 수확량에 따른 수면 시간을 조절하고 트래픽 양을 고려하여 기존의 알고리즘 보다 평균 에너지 소비량 측면에서 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 적절한 수확 시간을 측정하여 기존의 RF-AASP 알고리즘 보다 낮은 지연을 갖고 처리량 측면에서는 RF-AASP 알고리즘이 보다 좋은 성능 나타내는 것을 알 수 있다.

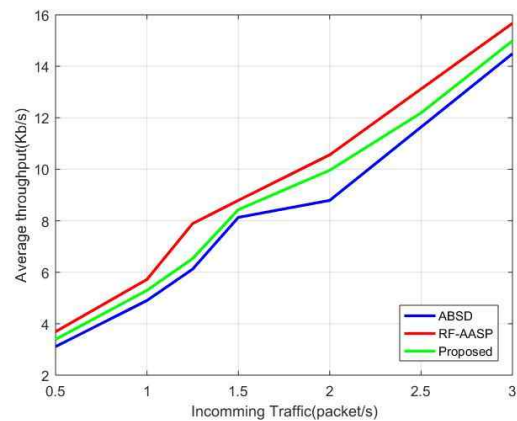


그림 5. 트래픽 부하 변화에 따른 평균 처리량

VI. 결론

본 논문에서는 에너지 하베스팅 무선 센서 네트워크에서 에

너지 관리 메커니즘을 이용하여 중단 간 지연시간을 최소화함과 동시에 에너지 효율을 향상시키는 알고리즘 및 MAC 프로토콜을 제안하였다. 제안된 기법에서는 에너지 하베스팅 기법과 네트워크 트래픽 양의 변동성을 고려하여 Duty Cycle을 조정하였다. 또한, 시뮬레이션을 통해 제안된 기법을 사용하면 에너지 효율을 향상시키고 중단 간 지연시간을 단축함으로써 패킷 전송율을 향상시킬 수 있음을 보였다. 향후에는 다양한 무선 센서 네트워크와 응용에 제안된 기법을 적용하여 에너지 수확 시간 조정에 따른 에너지 효율 및 처리율 향상과 네트워크 전송 지연 감소 간의 상관관계를 보다 정확히 측정할 수 있는 기법에 대한 연구를 수행하고자 한다.

REFERENCES

- [1] A. Zouinkhi, K. Mekki and M. N. Abdelkrim, "Application and Network Layers Design for Wireless Sensor Network to Supervise Chemical Active Product Warehouse," *International Journal of Computer Science, Engineering and Applications(IJCSEA)*, 2014.
- [2] N. A. Alrajeh, J. Lloret, and A. Canovas, "A Framework for Obesity Control Using a Wireless Body Sensor Network," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014.
- [3] 이효승, 오재철, "의료물류선 사용과 관련된 효율적인 인증서 관리 시스템 설계 및 구현," *스마트미디어저널*, 제 5권, 제 1호, 114-121쪽, 2016년 3월
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey," *Computer Networks*, 2001.
- [5] Hao Wei-Dong, Zhu Bo-Xuan, "Smart Home Wireless System Using Zigbee and IEEE 802.15.4," *2016 Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, pp. 858-863, 2016.
- [6] 최민호, 김영상, "Zigbee와 GPS를 이용한 해녀 사고예방 스마트 모니터링 시스템 개발," *스마트미디어저널*, 제 5권, 제 3호, 74-80쪽, 2016년 9월
- [7] 김남호, "사물인터넷 기반의 해양 적·녹조 실시간 모니터링 시스템 설계," *스마트미디어저널*, 제 5권, 제 1호, 130-136쪽, 2016년 3월
- [8] Tingwen Ruan, Zheng Jun Chew, Meilig Zhu, "Energy-Aware Approaches for Energy Harvesting Powered Wireless Sensor Nodes," *IEEE Sensor Journal*, vol.17, 2165-2173, 2017.
- [9] Junling Li, Danpu Liu, "An Energy aware distributed clustering routing protocol for energy harvesting wireless sensor networks," *2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China(ICC)*, pp. 1-6, 2016.
- [10] Muhammad Hassan, Amine Bermak, "Solar Harvested Energy Prediction Algorithm for Wireless Sensors," *2012 4th Asia Symposium on Quality Electronic Design (ASQED)*, pp. 178-181, 2012.
- [11] Adnant Jushi, Alain Pegatoquet, Trong-Nhan Le, "Wind Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Networks," *2016 Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*, pp. 301-308, 2016.
- [12] Jose A. Cutierrez, Edgar H. Callaway, Raymond Barrett, "IEEE 802.15.4 Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensor Networks," *IEEE Standards Office*, 2003.
- [13] M. Neugebauer, J. Plonnigs, K. Kabitzsch, "A New Beacon Order Adaptation Algorithm for IEEE 802.15.4 Networks," *Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks*, 2005.
- [14] Joseph Jeon, Jong Wook Lee, Jae Yeol Ha, Wook Hyun Kwon, "DCA - Duty Cycle Adaptation Algorithm for IEEE 802.15.4 Beacon-enabled Networks," *2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring*, 2007.
- [15] Hadi Rasouli, Yousef S. Kaviani, Habib F. Rashvand, "ADCA: Adaptive Duty Cycle Algorithm for Energy Efficient IEEE 802.15.4 Beacon-Enabled Wireless Sensor Networks," *IEEE Sensors Journal*, 2014.
- [16] Thien D. Nguyen, Jamil Y. Khan, Duy T. Ngo, "An Energy and QoS-Aware Packet Transmission Algorithm for IEEE 802.15.4 Networks," *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2015.
- [17] Thien D. Nguyen, Jamil Y. Khan, Duy T. Ngo, "An Adaptive MAC Protocol for RF Energy Harvesting Wireless Sensor Networks," *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2016.
- [18] Abdelmalek Bengheni, Fedoua Didi, Ilyas Bambrik, "Energy-Harvested Management Mechanism for Wireless Sensor Networks," *2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B)*, 2017.

- [19] Mohammed Abo-Zahhad, Mohammed Farrag, Abdelhay Ali, Osama Amin, "An Energy Consumption Model for Wireless Sensor Networks," *5th International Conference on Energy Aware Computing Systems & Applications*, 2015.
- [20] Joseph E. Mbowe, George S. Oreku, "Quality of Service in Wireless Sensor Networks," *Wireless Sensor Network*, 2014.

저 자 소 개



박석우(학생회원)

2017년 군산대학교 정보통신공학과
(공학사).

2019년 군산대학교 전자정보공학부
(공학석사).

<주관심분야 : 무선 센서 및 에드혹 네트워크,
PS-LTE>



나인호(정회원)

1988년 울산대학교 전자계산학과
(공학사).

1991년 중앙대학교 전자계산학과
(공학석사).

1995년 중앙대학교 전자계산학과
(공학박사).

1995~현재 군산대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수

<주관심분야 : 유비쿼터스 컴퓨팅, 무선 센서 및 에드혹 네트워크, 텔레메틱스, IoT, PS-LTE, 블록체인>