

# 에너지 하베스팅 무선 센서네트워크를 위한 전력기반 Pipelined-forwarding MAC프로토콜

## A Power-based Pipelined-forwarding MAC Protocol for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

심 규 욱\* · 박 형 근†  
(Kyuwook Shim · Hyung-Kun Park)

**Abstract** - In this paper, we propose the power-based pipelined-forwarding MAC protocol which can select relay nodes according to the residual power and energy harvesting rate in EH-WSN (energy-harvesting wireless sensor networks). The proposed MAC follows a pipelined-forwarding scheme in which nodes repeatedly sleep and wake up in an EH-WSN environment and data is continuously transmitted from a high-level node to a low-level node. The sleep interval is adaptively controlled so that nodes with low energy harvesting rate can be charged sufficiently, thereby minimizing the transmission delay and increasing the network lifetime. Simulation shows that the proposed MAC protocol improves the balance of residual power and network lifetime.

**Key Words** : Wireless sensor network, Energy harvesting, Pipelined-forwarding MAC, Network lifetime

### 1. 서 론

EH-WSN에서는 에너지 수집을 통해서 센서노드들은 보다 오랜 수명을 갖게 되고 보다 안정적인 네트워크 유지가 가능하게 된다. EH-WSN의 설계에 있어서 MAC프로토콜은 throughput, delay, 에너지 소모 등의 성능을 결정하는 매우 중요한 역할을 한다[1]. 기존의 대부분의 MAC프로토콜은 라우팅 프로토콜과는 무관하게 설계되었다. 그러나 라우팅과 독립적으로 MAC 프로토콜을 설계하는 것은 오버헤드의 증가로 인해 네트워크 수명의 감소로 이어질 수 있다. 따라서 센서네트워크에서의 라우팅프로토콜을 고려하여 MAC프로토콜을 설계하는 crossed-layer 방식을 통해 네트워크 성능을 보다 향상시키려는 연구들이 진행되었다[2]. 센서네트워크에서 라우팅을 고려한 MAC 프로토콜로서, 멀티홉 라우팅에 의한 end-to-end delay를 줄이기 위해 pipelined-forwarding 기법을 적용한 PRI-MAC[3]와 같은 매체접근제어 프로토콜이 제안되었으며 에너지의 효율적 사용을 위해 RP-MAC[4]가 제안되었다. 그러나 센서네트워크에서 end-to-end 지연뿐 아니라 노드의 잔여 전력문제는 네트워크의 수명과 관련한 매우 중요한 기술적 이슈가 된다. 특히 에너지 수집형

무선 센서네트워크에서 라우팅 및 MAC프로토콜의 설계에 있어서 노드의 잔여전력 및 에너지 수집상황은 반드시 고려되어야 할 설계 요소가 된다. 실제 환경에서는 소비되는 에너지 보다 충분히 많은 에너지 수집이 어려운 상황이 많이 발생하게 된다. 따라서 pipelined-forwarding 방식의 멀티홉 전송에서 전력이 고갈되지 않고 노드들이 안정적으로 데이터를 릴레이할 수 있도록 하는 MAC프로토콜의 설계가 요구된다.

이를 위해 본 논문에서는 잔여전력과 에너지 수집율에 따라 릴레이노드를 선택하고 에너지 수집율이 낮은 노드들로 하여금 충분한 충전이 될 수 있도록 슬립구간을 적응적으로 제어할 수 있는 MAC프로토콜을 제안한다. 제안된 MAC프로토콜은 pipelined forwarding 방식으로 데이터를 중계하며 노드들의 잔여전력과 에너지수집능력을 고려하여 중계노드로 동작하는 노드들의 매체접근 가능성을 조절하고 적응적으로 노드들의 슬립구간을 설정한다. 이를 통해 중계노드들이 전력부족상태에 놓이지 않도록 하고 전력의 불균형을 완화하여 안정적인 데이터 중계가 가능하도록 하였다.

### 2. 전력기반 Pipelined-forwarding MAC

센서 네트워크는 멀티홉 전송에 의해 데이터를 싱크노드에 전달한다. 그림 1과 같이 연속적인 데이터 릴레이가 이루어지는 pipelined-forwarding 전송에서 노드들을 싱크를 중심으로 하여 거리에 따라 레벨로 나누고 데이터 패킷은 높은 레벨의 노드에서 낮은 레벨의 노드로 멀티홉 방식으로 싱크노드에 전달된다[3].

† Corresponding Author : School of Electrical Electronic and Communication Engineering, KOREATECH, Korea.

E-mail: [hkpark@koreatech.ac.kr](mailto:hkpark@koreatech.ac.kr)  
ORCID: <https://0000-0001-8938-4909>

\* School of Electrical Electronic and Communication Engineering, KOREATECH, Korea.

Received : September 13, 2018; Accepted : December 19, 2018

동일한 레벨에 있는 노드들은 매체접속을 위해 서로 경쟁하게 되는 반면 서로 다른 레벨에 있는 노드들은 패킷 데이터의 전송을 위해 데이터를 중계해나가는 역할을 수행하게 된다. 따라서 동일 레벨내에 어떤 노드들이 경쟁을 통해 매체에 접속하느냐에 따라 전체적으로는 소스로부터 싱크까지의 전송경로가 설정되게 된다.

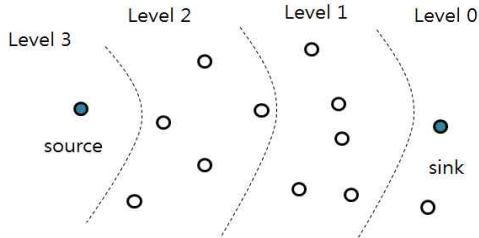


그림 1 Pipelined-forwarding을 위한 노드 레벨링  
Fig. 1 Level division for pipelined-forwarding

그림 2의 예에서 보듯이  $n$  레벨의 노드는  $n+1$  레벨의 노드로부터 데이터를 수신한 후에는  $n+1$  레벨의 노드에 ACK패킷을 전송한다. 이때 ACK패킷은  $n-1$ 레벨의 노드들에게 까지 전달되고 이를 수신한  $n-1$ 의 노드들은 비콘을 전송하여 데이터를 수신할 준비가 되었음을 알린다. 이때  $n-1$ 레벨에는 여러 노드들이 존재하고 서로 데이터를 송신받기위해 경쟁해야한다. 본 논문에서 제안하는 전력기반 Pipelined-forwarding MAC에서는  $n-1$  레벨에 존재하는 각각의 노드들은 자신의 잔여에너지와 에너지 수집율을 기반으로 자신의 우선권  $P_i$ 값을 계산하고  $P_i$ 값에 따라 backoff값을 설정하여 비콘전송을 시도하게 된다.

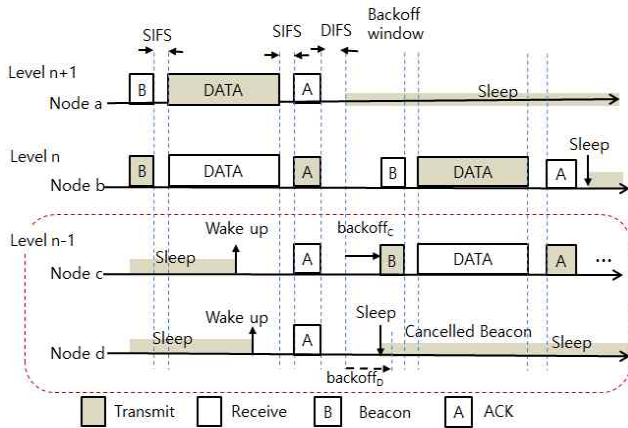


그림 2 전력기반 pipelined-forwarding MAC에서 데이터 전송의 예  
Fig. 2 Illustration of data transmission in power based pipelined-forwarding MAC

### 3. 잔여전력과 에너지 수집율에 따른 우선권결정

동일한 레벨의 노드들 중에 잔여전력과 에너지 수집율을 동시

에 고려한 우선권  $P_i$ 를 결정하여야 한다. 잔여전력과 에너지 수집율을 동시에 고려하기 위해 식 (1)과 같이 데이터를 릴레이하는데 소요되는 단위시간  $T_o$  후의 예상 잔여전력을 노드의 우선권  $P_i$  으로 설정하였다.

$$P_i = E_{r,i} + R_{h,i} T_o \tag{1}$$

$E_{r,i}$ 와  $R_{h,i}$ 는 각각  $i$ 번째 노드의 잔여전력과 에너지수집율을 의미한다.  $P_i$ 값이 최소 전력이하인 노드들은 데이터 전송의 충분한 에너지를 갖지 못하므로 최소전력이상으로 충전될 때까지 수면상태를 유지하도록 한다. 노드별 우선권이 주어진다 해도 에드혹 네트워크에서는 네트워크를 관리하는 기지국이 존재하지 않으므로 우선권에 따라 충돌을 줄이며 채널에 접속할 수 있는 프로토콜이 요구된다. 본 논문에서는 노드의 우선권에 따라 채널 접속확률을 달리하여 backoff를 다르게 하여 패킷의 충돌을 최소화하도록 MAC프로토콜을 설계하였다. 본 논문에서는 CW(contention window)을 CW1과 CW2으로 구분하고 CW1은  $P_i$  값이  $2E_o$  이상 되어 패킷 전송으로 인한 에너지 소모가 다음 번 패킷전송에 영향을 미치지 않는 노드들이 경쟁하는 구간이다. 이때  $E_o$ 는  $T_o$ 시간구간 동안 릴레이노드로 동작하기 위해 필요로 되는 전력이다. 그 외의 노드들은 CW2의 구간에서 경쟁을 하게 되며 CW1에 노드들이 존재하게 되면 CW2의 노드들은 바로 sleep구간으로 들어가게 된다.

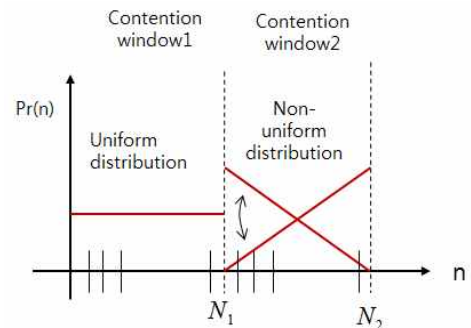


그림 3 노드의 우선권에 따른 두 가지 모드의 경쟁원도우  
Fig. 3 Contention Windows due to the priority

그림 3에서처럼 CW1과 CW2의 접속확률  $P_r(n)$ 을 구분한다. CW1에서 모든 노드들은 다음 주기에서 패킷을 전송할 충분한 에너지를 갖게 되므로 균일한 접속확률을 갖고 채널에 접속하게 된다. 그러나 CW2에서는 다음번 주기에서 패킷전송을 위한 충분한 에너지를 확보하기 어렵기 때문에 에너지 상황을 고려한  $P_i$ 값에 따라 다른 확률분포를 갖고 채널에 접속하도록 한다.  $P_i$  값이 높을수록 앞의 슬롯에서 채널에 접속할 확률이 더 커지게 된다. CW2에서 backoff 설정을 위해 전체 CW2의 길이  $N_2$  중  $n$ 번째 backoff 에서 비콘을 전송할 확률을 식 (2)과 같이 정의 한다.

$$\Pr(n) = m_i \left( n - \frac{N_2}{2} \right) + \frac{1}{N_2}, \quad m_i = 2 \left( \frac{P_i}{E_0} - 1 \right) \quad (2)$$

#### 4. 슬립구간의 설정

경쟁구간을 CW1과 CW2로 나누었기 때문에 CW2의 전력상황이 좋지 않은 노드들은 CW1의 노드들에 따라 슬립구간을 조절할 수 있다. 비콘을 전송하고자 하는 노드들이 CW1 구간에서 어떤 경쟁도 발생하지 않는다면 모든 노드들은 CW2에서 채널접속을 위한 경쟁에 참여한 후  $T_o$  구간동안 슬립모드로 들어간다. 만약 CW1에서 전송을 시도하는 노드가 있다면 해당노드는 다음 듀티사이클 주기 후에도 역시 데이터를 전송할 수 있는 충분한 전력을 갖는 노드가 존재함을 의미한다. 따라서 CW2의 노드들은  $2T_o$  동안 슬립모드로 들어갈 수 있다. 이와 같이 경쟁구간을 둘로 나누고 전력상황이 좋지 못한 노드들로 하여금 전력상황이 좋은 노드들의 존재를 인식할 수 있도록 함으로써 추가적인 정보의 교환이 없이 슬립구간의 길이를 조절할 수 있게 된다.

#### 5. 실험 및 성능 분석

본 논문에서 시뮬레이션을 통해 제안한 전력기반 pipelined-forwarding MAC의 성능을 분석을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 3개 레벨에 균일하게 분포하도록 노드들을 배치하였으며 노드들의 에너지 수집율은 0.28~7.3 mW 사이에서 균일분포를 갖도록 설정하였으며 노드들의 배터리 용량은 10 J로 하였다. 본 연구에서 경쟁윈도우 CW1과 CW2 각각의 backoff exponent의 초기값을 3으로 설정하고 충돌이 발생할 때마다 1씩 증가시켜 최대7까지 증가하도록 설정하여 각각의 경쟁윈도우를 0~127 가 되도록 하였다.

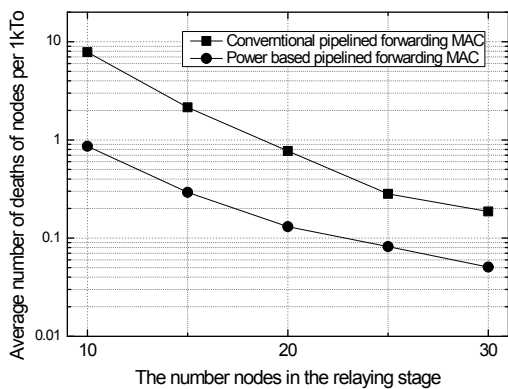


그림 4 1000  $T_o$  동안 노드의 평균 죽는 횟수

Fig. 4 Average number of deaths of nodes per 1000  $T_o$

그림 4는 중계노드의 갯수에 따른 노드당 평균 죽는 횟수를 나타낸 것으로 잔여전력이 5% 이하로 떨어지면 노드의 수명이 다하는 것으로 간주하였다. 그래프에서 보듯이 잔여전력과 에너지 수집율에 기반한 MAC 프로토콜이 노드의 수명을 보다 연장할 수 있음을 확인할 수 있으며 이는 네트워크 수명을 연장시킬 수 있는 요인이 된다.

#### 6. 결 론

본 논문에서는 EH-WSN에서 멀티홉전송을 위해 중계노드를 선택하기 위한 전력기반의 pipelined forwarding MAC프로토콜을 제안하였다. 제안된 MAC프로토콜은 타 노드들의 전력상황을 모르는 분산 에드혹 네트워크 환경에서, 잔여전력 및 에너지 수집능력에 따라 채널 접속의 우선권을 부여하기 위해 경쟁윈도우를 두 구간으로 구분하고 에너지 상황에 따라 채널접속확률을 다르게 설정하였다. 에너지 상황이 좋을수록 채널접속의 확률을 증가시켜 중계노드들간의 전력불균형을 완화하고 노드들의 수명을 증가시켜 네트워크 수명을 증가시킬 수 있도록 하였다. 시뮬레이션을 통한 성능비교 분석을 수행하였으며 전력상황을 고려하지 않는 기존의 pipelined forwarding MAC프로토콜에 비해 노드 및 네트워크 수명에 있어 큰 개선이 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2017R1D1A3B03034202)

#### References

- [1] S. Kosunalp, "MAC protocols for energy harvesting wireless sensor networks: survey", *ETRI journal*, Vol. 37, No. 4, pp. 804-812, August 2015.
- [2] M. Hefeida, T. Canli and A. Khokhar, "Supporting Multi-hop and multi-packet transmission in asynchronous WSNs", *IFIP Wireless Days Conf.*, pp. 1-6, Oct. 2011.
- [3] F. Tong, M. Ni, L. Shu and J. Pan, "A pipelined-forwarding, routing-integrated and effectively-identifying MAC for large-scale WSN", *IEEE Global Communication Conf.*, pp. 225-230, Dec. 2013.
- [4] N. Nguyen and M. Kim, "Reduced-Pipelined Duty Cycle MAC Protocol (RP-MAC) for Wireless Sensor Network", *KSI Transactions on internet and information systems* Vol. 11, No. 5, pp. 2433-2451, May 2017.

## 저 자 소 개



### 심 규 욱 (Kyuwook Shim)

2013년 3월~현재 : 한국기술교육대학교  
전기전자통신공학부 학사과정  
관심분야 : 정보통신, 센서네트워크



### 박 형 근 (Hyung-Kun Park)

1995년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사  
1997년 2월 : 고려대학교 전자공학과 석사  
2000년 8월 : 고려대학교 전자공학과 박사  
2000년 9월~2001년 8월: Univ. of Colorado  
at Colorado Springs, PostDoc.  
2001년 9월~2004년 2월 : 현대시스콤 선임연구원  
2010년 8월~2011년 7월 : Georgia Tech 방문교수  
20004년 3월~현재 : 한국기술교육대학교 교수  
관심분야 : 인지무선통신, 무선자원관리, 센서네트워크