

## 에너지 수집형 무선 센서네트워크에서 센싱된 데이터에 기반한 듀티사이클 스케줄링기법

박형근\*

### Sensed Data based Duty-Cycle Scheduling Scheme for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

Hyung-Kun Park\*

\*School of Electrical Electronic and Communication Engineering, KOREATECH, Cheonan 31253, Korea

#### 요 약

센서네트워크의 전력문제를 해결할 수 있는 에너지 수집형 무선 센서네트워크(EH-WSN)에 대한 관심이 증가하고 있다. EH-WSN에서는 에너지 수집과 소비의 균형을 맞추기 위한 on-off 듀티사이클링에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 환경감시를 위한 EH-WSN에서 센싱된 데이터의 긴급성과 에너지 수집율은 네트워크의 성능을 결정하는 중요한 요소가 된다. 따라서 단순히 전력의 균형 상태를 유지하는 것 이외에 센싱된 데이터의 중요도 및 에너지 수집율에 따라 듀티사이클 주기를 조절할 필요성이 대두된다. 본 논문에서는 환경감시를 위한 EH-WSN에서 기존의 전력만을 고려한 on-off 듀티사이클링의 문제점을 분석하고, 센싱값의 변화율 및 크기값에 의한 센싱 데이터의 우선순위 및 에너지 수집율 등을 고려하여 적응적으로 on-off 주기를 결정하는 듀티사이클 스케줄링 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 듀티사이클 스케줄링의 성능을 분석하였다.

#### ABSTRACT

There is a growing interest in EH-WSN (energy-harvesting wireless sensor networks) that can solve power problems in wireless sensor networks. In EH-WSN, on-off duty cycling is being studied in order to balance energy harvesting and consumption. However, the urgency of the sensed data and the energy harvesting rate in the environmental monitoring EH-WSN are important factors to determine the network performance. Therefore, it is necessary to control the duty-cycle period according to the importance of the sensed data and the energy harvesting rate in addition to simply maintaining the balance of the power. In this paper, we analyze the problem of on-off duty cycling in EH-WSN for environmental monitoring and propose an adaptive duty-cycle scheduling scheme considering the priority of sensed data and energy harvesting rate, where the priority of sensed data determined by sensed value and changing rate. The performance of scheduling scheme was analyzed by computer simulations.

**키워드** : 무선 네트워크, 에너지 수집, 듀티사이클 스케줄링, 센서노드

**Key word** : wireless sensor network, energy harvesting, duty-cycle scheduling, sensor node

Received 29 January 2018, Revised 8 February 2018, Accepted 23 February 2018

\* Corresponding Author Hyung-Kun Park (E-mail:hkpark@koreatech.ac.kr, Tel:+82-41-560-1176)

School of Electrical Electronic and Communication Engineering, KOREATECH Cheonan 31253, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.4.670>

pISSN:2234-4772

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

무선센서네트워크는 IoT(Internet of Things)등 다양한 서비스의 개발과 함께 그 중요성이 더욱 커지고 있으며 환경감시, 국방, 건물관리, 작물재배 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 그러나 일반적으로 기존의 무선센서네트워크는 외부에서 전력을 공급받지 못하고 배터리에 의해 동작하므로 다른 네트워크와는 달리 잔여전력 부족으로 인한 네트워크 수명 단축 문제가 가장 큰 기술적 문제가 된다. 따라서 효율적 전력사용을 통해 네트워크 수명을 극대화하려는 다양한 연구들이 진행되어 왔다[1][2]. 무선 센서네트워크에서는 이러한 한정된 전력 문제를 해결하기 위해 듀티사이클링을 이용하여 센서노드가 전송에 참여하지 않을 때 주기적으로 sleep모드로 들어가 전력사용을 최소화 할 수 있는 다양한 에너지 효율적인 스케줄링 기법들이 제안되어 왔다 [3].

최근에는 기존 무선센서네트워크에서의 전력의 한계를 극복하기 위하여 주변 환경으로부터 태양광, 풍력 등의 에너지를 수집할 수 있는 에너지 하베스팅 기능을 갖는 무선 센서네트워크에 대한 관심이 증가하고 있다 [4][5]. 에너지 하베스팅 무선센서네트워크에서는 기존의 WSN과는 달리 주변의 에너지를 수집하여 충전할 수 있는 기능을 갖고 있으므로 단순히 에너지의 효율적 사용이 아니라 주변으로 부터의 에너지 수집을 등을 고려한 듀티사이클 스케줄링이 중요시된다. 센서노드는 저가의 소형으로 개발되기 때문에 대개의 EH-WSN 디바이스의 에너지 수집율은 노드가 동작하기 위해 필요한 전력에 비해 매우 작다 따라서 에너지 저장소 두어 노드가 동작할 수 있는 수준까지 전력을 충전하게 되고 [6] 에너지 하베스팅 무선센서네트워크에서는 수집된 전력과 소비전력이 균형을 이룰 수 있도록 듀티사이클 주기를 조절해야 한다[7].

EH-WSN에서 듀티사이클 주기를 결정할 때 요구되는 주요 요소로는 하나의 시스템을 에너지 균형 상태를 통해 전력을 충분한 상태로 유지시키는 것이다. 즉, 에너지가 수집되는 수집율이 소비되는 에너지를 보상할 수 있는 ENO (energy neutral operation)상태에 있어야 한다[8]. 만약 패킷전송을 위해 요구되는 에너지가 충분히 수집되지 못하면 패킷전송이 불가하게 되며 반대로 에너지가 데이터 전송에 비해 빠르게 수집되면 에너지 저장소의 제한된 용량으로 인해 Energy overflow가 발

생하여 수집된 에너지의 낭비로 이어질 수 있다.[9] 따라서 에너지 하베스팅 WSN에서의 대부분의 연구들은 에너지 소비가 주변 환경에서 수집되는 에너지를 초과하지 않으면서 초과 수집된 에너지가 낭비되지 않도록 에너지 수집과 소비의 균형을 이루기 위한 전송프로토콜의 설계에 초점을 맞추고 있다.

에너지 낭비를 최소화 하기 위한 charge-and-spend strategy 방식은 노드가 충분한 에너지를 수집하게 되면 노드는 즉시 턴온 상태로 전환하고 데이터를 전송모드에 진입한다[7]. 이 경우는 on-off 듀티사이클 주기는 에너지의 수집률에 직접적으로 의존하여 결정되게 된다. 센서노드의 듀티사이클 주기는 단순히 전력만을 고려하여 결정되어야 할 것이 아니라 센싱된 데이터의 특성을 고려하여 우선권이 결정되어야 한다. [10]에서는 센서노드의 듀티사이클 주기를 센싱된 온도데이터의 특성을 바탕으로 하여 조절하고 있다. 온도의 증감이나 정상 및 비정상 상태를 인식하여 듀티사이클 주기를 조절함으로써 온도정보에 대한 지연을 줄일 수 있는 방안이 제시되었다.[10]

그러나 센싱 데이터는 단순히 그 값만이 중요한 것이 아니라 데이터의 변화 추이를 반영하는 것이 중요하다. 즉 데이터의 변화율 또한 중요한 의미를 갖게 된다. 또한 에너지 수집율이 시간에 따라 크게 변화하는 환경에서는 에너지 수집율에 따라 적응적으로 듀티사이클 주기를 변화시켜줘야 한다. 따라서 본 논문에서는 환경감시를 위한 에너지 하베스팅 센서네트워크에서 기존의 전력만을 고려한 on-off 듀티사이클링의 문제점을 분석하고 센싱된 데이터의 우선순위 및 에너지 수집을 등을 고려하여 적응적으로 on-off 듀티사이클 주기를 결정하는 스케줄러를 제안하고자 한다.

## II. 데이터 기반 듀티사이클링

본 논문에서는 송신 기능만을 갖는 센서노드를 고려하며 에너지 수집, 센싱, 데이터 전송의 세가지 모드로 동작하는 것을 가정하였다. 에너지 수집의 단계에서 노드는 에너지수집기능외의 통신모듈은 턴 오프한 상태가 되어 전력소모를 최소화하며 단말이 턴 온되면 센싱과 전송을 수행하게 된다. 그림 1은 기본적인 센서노드의 동작 및 에너지 특성을 도시한 것이다.

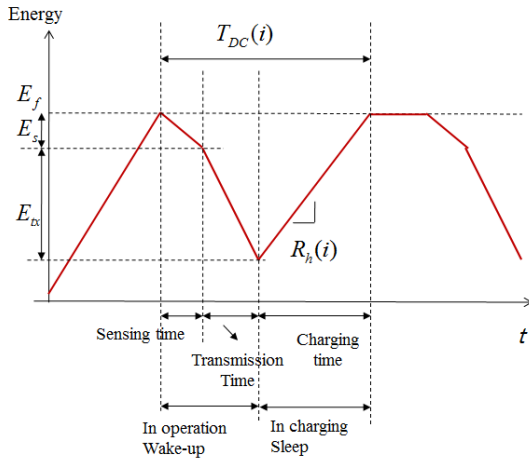


Fig. 1 Energy model for EH-WSN

그림 1에서  $T_{DC}(i)$ 는  $i$ 번째 듀티사이클 주기를 의미하며  $E_f, E_s, E_{tx}$ 는 각각 완전 충전시 에너지, 센싱 및 송신에 소모되는 에너지를 의미한다.  $R_h(i)$ 는  $i$ 번째 듀티 사이클 주기에서 에너지 수집율을 의미한다.

본 논문에서는 환경감시 센서네트워크를 대상으로 하였으며 태양광에너지를 수집하는 태양광 에너지 하베스팅 센서네트워크를 고려하였다. 환경감시 센서네트워크에서는 화재 등의 이상 상태를 감지하여 신속하게 그 정보를 서버에 전달해야한다. 따라서 센싱된 데이터의 변화가 급격히 발생할수록 더 세밀한 환경감시가 요구되므로 센싱된 값이 변화하는 정도에 따라 듀티사이클의 주기를 바꿔줘야 한다. 또한 센싱된 값이 증가할수록 이상상태로 진입하게 되므로 센싱값의 증가에 따라서도 듀티사이클 주기가 조절되어야한다. 즉, 화재감시의 경우 온도의 변화가 별로 없거나 온도값이 낮은 경우는 센싱주기가 길어도 괜찮지만 온도의 변화가 커지거나 온도의 절대값이 커진다면 더 듀티사이클 주기를 줄여 센싱 및 데이터 전송을 빈번하게 수행하여야 한다. 이와 같이 온도 즉 센싱된 데이터 및 그 변화율과 에너지 수집율에 따라 적응적으로 센싱주기를 제어할 수 있는 기법이 필요로 된다.

본 논문에서 제안하는 듀티 사이클 스케줄링은 데이터의 변화율과 그 크기값 및 에너지 수집율을 바탕으로 하여 듀티 사이클 주기를 적응적으로 결정하게 된다. 이를 위해 데이터 변화율에 따른 듀티사이클 주기를 설정하였다. 먼저 데이터 기반 센싱 스케줄링을 위해 먼저

다음과 같이  $i$ 번째 wake-up 상태에서 센싱된 데이터의 변화율  $R_d(i)$ 를 계산한다.

$$R_d(i) = \frac{\Delta d_s(i)}{T_{DC}(i)} = \frac{d_s(i-1) - d_s(i)}{T_{DC}(i)} \quad (1)$$

이때  $d_s(i)$ 는 센싱된 데이터값을 나타내며  $\Delta d_s(i)$ 는 이전 센싱값과 현재 센싱값의 차이로 센싱된 데이터의 시간적 변화율을 계산하는데 사용된다. 이렇게 구한 센싱된 데이터의 변화율을 이용하여 다음에 단말이 깨어날 시간주기  $T_{DC}(i+1)$ 을 다음과 같은 식(2)를 이용하여 구한다. 식(2)는 데이터의 변화율에 따라 세 가지 경우로 나누어 각각의  $T_{DC}(i+1)$ 를 결정하게 된다.

$$T_{DC}(i+1) = \begin{cases} T_{DC,max} & , R_d(i) < R_{d,min} \\ -(R_d(i) - R_{d,min})^2 + T_{DC,max} & , R_{d,min} \leq R_d(i) < R_{d,max} \\ T_{DC,min} & , R_{d,max} < R_d(i) \end{cases} \quad (2)$$

식(2)에서 데이터의 변화율  $R_d(i)$ 가 사전에 설정한 최소값  $R_{d,min}$  이하로 떨어질 경우 센싱주기는 최대값  $T_{DC,max}$ 을 갖게 된다. 이는 온도변화가 거의 없더라도 주기적으로 온도정보를 센싱해야 하는 최대 시간간격을 의미한다. 단, 온도의 변화가 거의 없다 해도 온도의 절대값이 커지면 듀티사이클 주기를 줄여 보다 빨리 센싱과 데이터 전송을 수행해야한다. 따라서 듀티사이클 주기의 최대값  $T_{DC,max}$ 는 다음의 식과 같이 센싱된 데이터가 커짐에 따라 선형적으로 감소하도록 설정한다.

$$T_{DC,max} = T_{DC,0} - (1 - \alpha) T_{DC,0} \frac{d_s(i)}{d_{s,max}} \quad (3)$$

위 식에서 가장 안정적인 센싱데이터의 값을 0으로 보정함을 가정했을 때  $T_{DC,0}$ 는 측정값이 0 일 때 갖을 수 있는 최대 듀티사이클 주기 나타낸다.  $\alpha$  값은 센싱된 값이 커짐에 따라  $T_{DC,max}$ 가 줄어드는 비율로 센싱된 값이 최대값  $d_{s,max}$ 이 되면  $T_{DC,max}$ 는  $\alpha T_{DC,max}$ 까지 줄어든다.

데이터변화율이  $R_d(i)$ 이 최대값  $R_{d,max}$ 과 최소값

$R_{d,\min}$  사이에 들어갈 경우의 새롭게 갱신된 듀티사이클 주기는 식(2)와 같이 이전 센싱데이터의 변화율이 증가할수록 감소하며 데이터의 변화율이 감소할수록 증가한다. 이때 센싱데이터의 변화율이 커질수록 듀티사이클 주기는 그림 2에서 보듯이 제공에 비례하여 감소하도록 하였다.

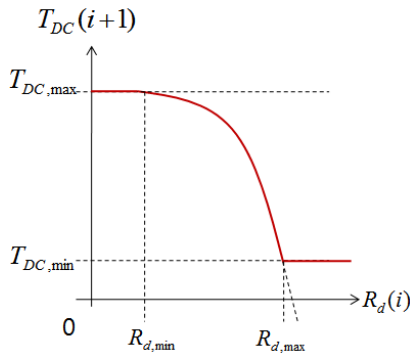


Fig. 2 Sensing period according to the data changing rate

저속충전상태에서 센싱데이터의 변화율에 따라 데이터의 중요도를 판별하여 wake-up 시점을 조절함으로써 비정상상태 발생시 그 시점을 보다 빨리 인지할 수 있도록 한다. 그림 2에서  $R_{d,\min}$  과  $R_{d,\max}$  는 사전에 설정된 값으로 듀티사이클 주기를 변화시킬 수 있는 센싱된 데이터의 최소 및 최대 변화율을 의미한다.  $i$ 번째 wake-up 상태에서 센싱된 데이터의 변화율  $R_d(i)$  이  $R_{d,\min}$  과  $R_{d,\max}$  사이에서 변화할 때 듀티 사이클 주기  $T_{DC}(i)$  는 그림과 같이  $T_{DC,\min}$  과  $T_{DC,\max}$  사이에서 변화하게 된다. 마지막으로 데이터의 변화율이 매우 높아지는 경우에는 듀티사이클 주기를 최소화해야 한다. 그러나 센싱주기가 아무리 최소화 되더라도 노드가 에너지를  $E_f$ 까지 충전하지 못하면 센싱된 데이터를 전송하지 못하게 되므로 노드의 듀티사이클 주기는 충전주기를 넘어서 수 없게 된다. 따라서 데이터의 변화율이 설정된 최대값  $R_{d,\max}$  를 넘어설 경우에는 센싱주기는 노드가 완충되는 시간간격  $T_{DC,\min} = \widehat{T}_h(i+1)$  이 되어야 한다. 이때 완충시간에 대한 예측값은 다음과 같이 예측 에너지 수집율로 구해진다.

$$\widehat{T}_h(i+1) = \frac{E_f}{\widehat{R}_h(i+1)} \quad (4)$$

이와 같이 듀티사이클이 아무리 작아져도 에너지 수집율을 넘지 못하도록 함으로써 전력이 고갈되는 현상을 방지하도록 한다.

### III. 실험 및 성능분석

본 논문에서에서 제안하는 센싱 및 전송 스케줄링의 성능분석을 위하여 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 에너지 수집률과 센싱된 온도값에 따른 센싱 및 전송 스케줄링에 대한 성능분석을 위해서 노드간의 패킷 충돌 등은 고려하지 않았으며 센서노드는 수신기능 없이 송신만 가능한 센서노드로 가정하여 오프모드, 센싱모드 그리고 전송모드의 3가지 동작모드로 동작하는 것으로 한다. 데이터 특성에 기반한 센싱스케줄링 알고리즘에 대한 자체 성능을 도출함으로써 센싱 스케줄링의 효율성을 분석하였다.

그림 3과 4는 온도가 그림과 같은 가우시안 곡선으로 변한다고 가정할 때 단말의 wake-up 시점을 표시한 것이다. 그림에서 보듯이 듀티 사이클 주기는 온도가 증가함에 따라 그리고 온도의 변화량이 커짐에 따라 작아지는 것을 볼 수 있다. 이때 최소 듀티 사이클 주기는 에너지 수집률에 제한되므로 그림 4에서와 같이 에너지 수집율이 5mW/s로 증가하게 되면 최소 듀티 사이클이 작아지게 되어 높은 온도와 높은 온도 변화량의 지점에서 보다 빈번한 센싱이 이루어짐을 알 수 있다.

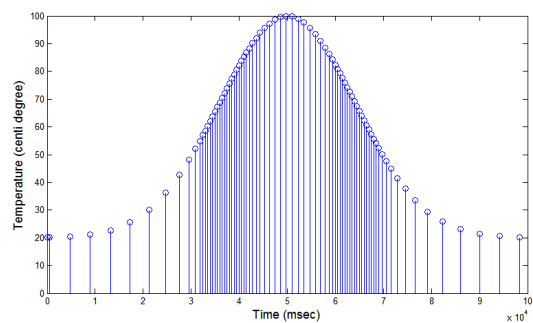


Fig. 3 Wake-up time when energy harvesting rate is 1 mW/s

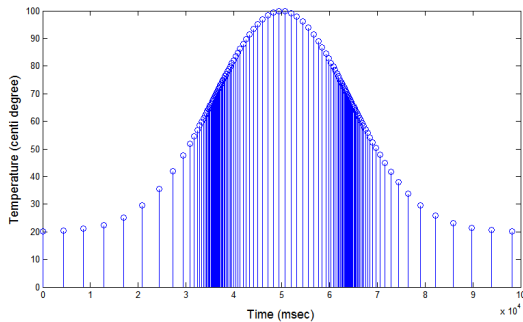


Fig. 4 Wake-up time when energy harvesting rate is 5 mW/s

그림 5는 센싱된 온도 데이터를 간단한 선형 보간하였을 때 얻어지는 값들과 원래의 온도 데이터사이의 평균제곱근오차(RMSE)값을 나타낸다. 그림에서 보듯이 에너지 수집율이 높아질수록 원래의 환경 데이터에 가까운 데이터를 복원할 수 있음을 의미한다. 또한  $T_{DC,max}$  값이 작아질수록 듀티사이클의 주기가 더 작아지므로 더욱 더 원래의 데이터 값에 가까운 데이터를 얻을 수 있게 된다.  $T_{DC,max}$ 는 센싱데이터의 크기값에 의존하므로 환경 데이터 값이 더 커짐에 따라 더 정확한 정보를 얻을 수 있음을 의미한다.

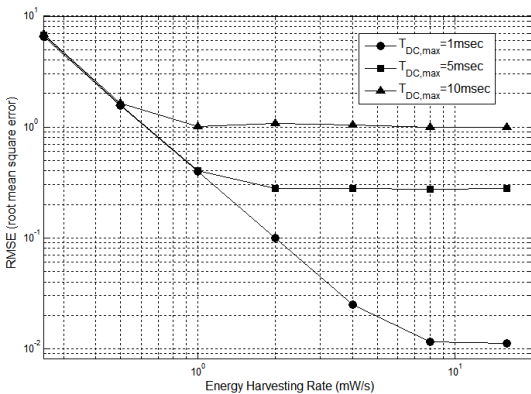


Fig. 5 Root mean square error between original and sensed data.

그림 6은 온도의 변화율에 따른 듀티사이클에 의한 전송지연을 보여준다. 듀티사이클이 커지게 되면 노드의 턴오프시간이 길어지게 되므로 그만큼 전송지연이 발생하게 된다. 그림에서 보듯이 듀티사이클 스케줄링의 경우는 온도의 변화가 커짐에 따라 듀티 사이클이 작

아지게 되므로 그만큼 전송지연이 줄어들게 된다. 즉 온도의 변화가 크게 발생하는 상황은 데이터의 중요도가 증가하는 상황이므로 전송지연을 최소화하여야 한다. 단, 듀티 사이클의 최소주기는 에너지수집율에 제한을 받으므로 센싱데이터의 변화율이 일정 수준을 넘게 되면 전송지연은 최소값에 수렴하고 더 이상 줄어들지 않게 된다. 에너지 수집율이 커짐에 따라 그만큼 더 듀티 사이클 주기가 줄어들게 되므로 전송지연의 에너지 수집율에 비례하여 감소하게 된다.

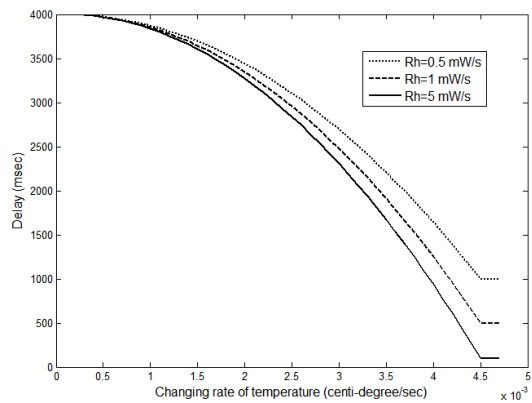


Fig. 6 Time delay according to harvesting rate and data changing rate

#### IV. 결론

에너지 하베스팅 센서네트워크에서는 센싱된 데이터의 중요도 및 전력수집률은 노드의 송수신을 결정하는 중요 요소가 된다. 본 논문에서는 환경감시 EH-WSN을 위해 센싱된 데이터의 긴급성과 에너지 수집율에 따라 듀티사이클 주기를 적응적으로 설정할 수 있는 알고리즘을 제한하였다. 센싱된 데이터의 변화율과 크기값이 커짐에 따른 듀티사이클 주기를 줄임으로써 전송긴급성이 높은 데이터의 지연을 감소시키도록 하였으며 에너지 수집율에 따라 듀티사이클의 최소값을 제한함으로써 노드의 에너지 불균형상태로 인한 전송불능상태를 억제하도록 하였다.

### ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education ( 2017R1D1A3B03034202 )

### REFERENCE

- [1] P. Huang et al., "The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Survey Tutorials*, vol.15, no. 1, pp.101-120, April 2013.
- [2] Nagineni Sharoon, "Dynamic Path construction in Multi-Hop Wireless Networks", *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, vol.2, no.2, pp. 19-25, June 2016.
- [3] Y. Sun, O. Gurewitz, D. B. Johnson, "RI-MAC: a receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks", in *Proceedings of the 6<sup>th</sup> ACM conference on Embedded network sensor systems*, Raleigh: NY, pp. 1-4, November, 2008.
- [4] M. L. Ku, W. Li, Y. Chen and K. J. Ray Liu, "Advances in Energy Harvesting Communications: Past, Present, and Future Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.18, no.2, pp.1384-1412, 2016.
- [5] J. Yi, M. Kang and D. Noh, "Solar Energy Harvesting Wireless Sensor Network Simulator," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering* vol.19, no. 2, pp.477-485, Feb., 2015.
- [6] Z. A. Eu, H. P. Tan, Winston K.G. Seah, "Design and performance analysis of MAC schemes for wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting," *Ad Hoc networks*, vol.9, no. 3, pp.300-323, May, 2011.
- [7] J. He, L. Duan, FenHou, P. Hou, P. Cheng, and J. Chen, "Multiperiod Scheduling for Wireless Sensor Networks: A Distributed Consensus Approach", *IEEE Transaction. on signal processing*, vol. 63, no. 7, April, 2015
- [8] P. Ramezani, M. R. Pakravan, "Overview of MAC protocols for energy harveting wireless sensor networks," in *Proceedings of the IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Hongkong, pp.2032-2037, August 2015.
- [9] S. Kosunalp, "MAC protocols for energy harvesting wireless sensor networks: survey," *ETRI journal*, vol.37, no.4, pp.804-812, August 2015.
- [10] C. Shen, and S. Chen, "A cyber-physical design for indoor temperature monitoring using wireless sensor networks," in *Proceedings of 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, San Francisco: CA, pp. 1-6, March 2017.



박형근 (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  
 2004년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 교수  
 ※ 관심분야 : 인지무선통신, 무선자원관리, 센서네트워크