

An Efficient Energy Charging Scheme for Wireless Sensor Networks Using a Mobile Sink Capable of Wireless Power Transmission

Kyoung nam Park*, Ikjune Yoon**

Abstract

In this paper, we propose the algorithms which determine 1) the efficient anchor-node visiting route of mobile sink in terms of energy supply and 2) the efficient energy amount to be charged to each anchor node, by using the information of each anchor node and the mobile sink. Wireless sensor networks (WSNs) using mobile sinks can be deployed in more challenging environments such as those that are isolated or dangerous, and can also achieve a balanced energy consumption among sensors which leads to prolong the network lifetime. Most mobile sinks visit only some anchor nodes which store the data collected by the nearby sensor nodes because of their limited energy. The problem of these schemes is that the lifetime of the anchor nodes can be shorten due to the increased energy consumption, which rapidly reduces the overall lifetime of WSN. This study utilizes a mobile sink capable of wireless power transmission to solve this problem, so a mobile sink can gather data from anchor nodes while charging energy to them. Through the performance verification, it is confirmed that the number of blackout nodes and the amount of collected data are greatly improved regardless of the size of the network.

▶ Keyword: Wireless Sensor Network, Wireless Power Transmission, Mobile Sink, Anchor Node

I. Introduction

무선 센서 네트워크(WSN)는 초소형, 저비용, 저전력의 센서 노드들로 구성된 네트워크로써, 그 활용 분야가 군사, 환경, 건설, 의료 등으로 매우 광범위하다. 일반적인 WSN에서는 노드들이 센싱한 정보를 인터넷에 연결되어 있는 고정된 위치의 싱크 노드에 전달한다. 이때, 저사양 센서들의 리소스 제약 때문에 싱크 노드로의 데이터 전송을 여러 단계의 중간 노드들을 거쳐서 진행하는 멀티 홉 기법을 사용한다[1]. 이런 전통적인 WSN의 경우, 싱크 주변의 노드들은 데이터 릴레이 역할로 인하여 외곽 노드에 비해 에너지 소모가 크기 때문에 에너지가 빠르게 고갈되는, 핫스팟 문제를 가지고 있다. 이러한 문제는 센서 노드의 수명을 급격히 줄여들게 하여, WSN의 지속성을 떨어뜨리게 되므로, WSN 연구에서 반드시 해결해야 할 문제 중 하나이다. WSN의 초기 연구에서는 응용,

시스템, 운영체제, 네트워크 등 모든 분야 및 계층에서, 각 노드의 에너지 사용량을 최소화하여 WSN의 수명을 증가시켰다. 이러한 기법들로 인하여 WSN의 수명 및 성능에 많은 발전이 있었으나, 기본적으로 유한한 에너지양으로 인하여 그 영향에는 한계가 있을 수밖에 없었다. 이를 근본적으로 해결하기 위해 최근에는 에너지 재충전형 센서 네트워크가 연구되고 있으며, 그 결과 각 노드의 에너지 사용을 최소화하는 전략보다는 재충전되는 에너지를 효율적으로 사용하는 전략에 대한 연구들이 수행되고 있다[2]. 에너지 재충전형 WSN은 태양에너지 등의 주변 에너지를 이용하여 각 노드의 배터리를 재충전하거나, 자동차, 드론 등의 스마트 이동체가 무선 전력 전송 기법을 활용하여 노드의 배터리를 충전시킨다. 주변 에너지는 무한한 양이 존재한다는 장점이 있지만, 제어할

• First Author: Kyoung nam Park, Corresponding Author: Ikjune Yoon

*Kyoung nam Park (pkn0813@soongsil.ac.kr.), Dept. of Software Convergence, Soongsil University

**Ikjune Yoon (Ikjune.Yoon@gmail.com), School of Smart Systems S/W, Soongsil University

• Received: 2019. 04. 11, Revised: 2019. 05. 24, Accepted: 2019. 05. 27.

• This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF-2018R1D1A1B07042943)

수 없고, 예측하기 힘들다는 단점이 있다. 무선 전력 전송의 경우 이와는 반대의 특징을 갖는데, 특히 기술의 발전으로 고속 충전이 가능하다는 장점도 있다. 최근 10W급의 무선 전력 전송 기기도 출시되었고, 저 전력 무선 충전 기술의 연구도 활발히 진행되고 있다[3].

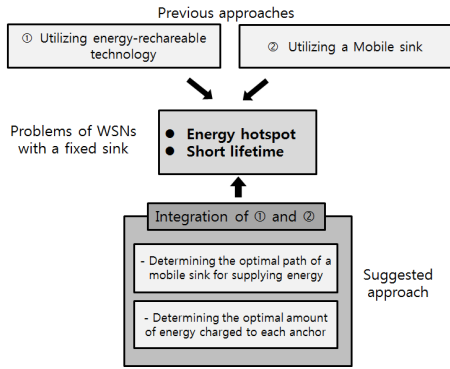


Fig. 1. Previous overview

에너지 재충전형 WSN과 함께, WSN의 수명 및 성능을 증가시키고자 연구되고 있는 주제에는 모바일 싱크를 활용하는 기법이 있다. 고정된 싱크와 달리 모바일 싱크는 지속적으로 이동하면서 데이터를 받게 되므로, 고정된 위치의 싱크노드를 사용할 때 발생하는 싱크 주변 노드와 외곽 노드 간의 에너지 불균형 문제를 어느 정도 해결해 줄 수 있다. 드론과 같이 에너지가 제한적인 모바일 싱크를 사용할 경우, 모든 노드를 순회하며 데이터를 수집하는 것이 어렵기 때문에 많은 연구에서 앵커 노드를 선정하여 센서 노드의 데이터를 임시로 수집하고 드론이 앵커 노드에 도착했을 때 저장된 데이터들을 드론에 전달하는 방법을 사용한다[4]. 이로 인해 앵커 노드들의 에너지 소모가 (일반 노드에 비해) 커지게 되어 이들의 수명 단축으로 이어져, 전체 네트워크의 수명을 줄어뜨리게 한다[5].

본 연구에서는 앵커노드 자체의 급속한 에너지 고갈 문제를 접근하여 해결하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 드론이 무선 에너지 충전 기술을 탑재한 환경을 가정하였다. 즉, 제한된 에너지를 가진 드론이 앵커 노드들을 방문하여 그들로부터 데이터를 수집함과 동시에 에너지를 충전해 주는 환경을 대상으로 한다. 드론이 가진 에너지는 자신의 이동이나, 앵커 노드로부터 데이터를 수집하는데 사용하거나, 앵커 노드를 충전시키는데 사용할 수 있다. 따라서 드론의 이동 경로를 최적화 하여 앵커 노드들에게 충전시킬 수 있는 에너지양을 확보해야 하며, 각 앵커 노드에도 부족하지도 과하지도 않은 필요한 만큼의 에너지를 충전시켜 주어야 한다. 이를 위하여, 본 연구에서는, 각 앵커 노드의 위치 및 에너지 정보 그리고 드론의 에너지 정보를 이용하여, 1) 에너지 공급의 측면에서 최적화된 드론의 앵커 노드 방문 경로와 2) 각 앵커 노드에게 충전해 주어야 할 최적의 에너지양을 결정하는 알고리즘을 제안한다. 그림 1에는 이와 같은 본 연구의 내용이 요약되어 있다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Wireless rechargeable sensor networks

[6]에서는 고정된 싱크와 모바일 싱크를 운용하는 상황에서, 모바일 싱크로 데이터 수집과 무선 전력 전송을 이용하는 기법을 제안했다. 센서는 고정된 싱크와 모바일 싱크의 위치를 파악 후, 홉 수가 적은 쪽으로 데이터를 전달함으로써 핫스팟 문제를 완화시키지만 센서들이 모바일 싱크의 위치를 파악하고 있어야 되는 오버헤드가 존재한다.

[7]는 무선 전력 전송이 가능한 모바일 싱크로 자동차 (SenCar)를 선정하였으며, SenCar의 이동 경로는 고정되어 있다. SenCar의 경우 에너지 자원이 무제한이기 때문에 SenCar의 에너지 소모에 대해 고려하지 않아도 되며, 미리 결정된 앵커 포인트로 이동하여 통신범위 안에 존재하는 노드의 에너지를 충전하고 데이터를 수거하게 된다. 각 노드에서 센싱된 데이터들은 앵커 포인트 내에 존재하는 노드에게 전달하게 함으로써 SenCar는 데이터를 효율적으로 수집할 수 있고, 앵커 포인트 내의 노드를 충전함으로써 에너지 핫스팟 문제를 해결할 수 있다. 그러나 유한한 에너지를 가지는 드론과 같은 모델에는 적용될 수 없다는 한계가 있다.

[8]에서는 무인 항공기를 이용하여 전원 공급 및 데이터를 수거하는 모바일 싱크를 제안한다. 연구에서는 드론에 의해 실행되는 모바일 충전 및 데이터 수거 방법이 실제 환경에서 가능한지를 실험을 통해 확인하는데 중점을 두었다. 필드 테스트는 건물과 농지에서 차례로 이루어졌으며, 실험 결과 센서 노드는 915MHz 주파수 대역을 통하여 DC전압으로의 변환이 가능하였고, 데이터 수거는 ZigBee 프로토콜을 사용하여 드론과 같은 무인 항공기가 무선 센서 네트워크에서 무선전력전송과 데이터 수거가 가능함을 확인할 수 있다. 다음 아래 표는 위의 무선 전력 전송 WSN에 관한 연구를 요약한 표[1]이다.

Table 1. Comparison of rechargeable Scheme

Paper	[6]	[7]	[8]
Compare	[6]	[7]	[8]
Kind of sink	Car	Car	UAV
Charging method	RF	RF	RF
Solution	Reduce the energy hot-spot problem	Improve amount of gathered data Reduce the energy hot-spot problem	Prove the mobile sink simulation
Problem	To occur the mobile sink location overhead	Apply the limited mobile sink	.

1.2 Wireless sensor networks using mobile sinks

서론에서 살펴보았듯이, 고정된 싱크의 에너지 핫스팟 문제로 인해 모바일 싱크의 개념이 도입되었다. 모바일 싱크의 연구는 이동경로의 확실성에 따라 크게 두 가지로 나뉘게 된다. 하나는 싱크가 무작위적으로 이동하며 데이터를 수집하는 경우와 고정된 구역을 따라 이동하는 경우이다.

싱크가 무작위적으로 이동하는 경우, 이동하는 싱크로 센싱 데이터를 전달함에 있어서, 싱크의 최근 위치를 알아내야 하는 등의 많은 어려움이 존재한다[9]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 다양한 연구들이 수행되었다. [10]의 기법에서는 노드의 개수와 상관없이 센서 필드를 균등한 크기의 구역으로 나눈 후 구역의 교차점에 위치하는 노드를 상위 노드로 선정하여 하위 노드들의 데이터를 수집하게 된다. 모바일 싱크의 위치는 상위 계층의 노드만 파악하게 하여 문제를 해결하였다. 그러나 균등한 구역 선정을 위한 지역 범람으로 인하여 에너지 소비가 증가하며, 상위 노드 주변에 에너지 핫스팟 문제가 여전히 존재한다. [11]에서는 클러스터링 기법을 통하여 노드의 개수에 따라 구역을 나누게 된다. 그렇게 되면 각 구역은 비슷한 에너지를 소비하기 때문에 [10]의 방식보다 안정적으로 볼 수 있다. [11] 기법에서는 클러스터의 레벨을 나눠 최상위 레벨의 클러스터에게 싱크의 위치를 전달한다. 당연히, 최상위 레벨의 클러스터는 다른 레벨의 클러스터보다 더 많은 에너지를 소비하므로, 클러스터 헤더 노드를 라운드 로빈의 방식으로 선출하여 에너지 핫스팟 문제를 해결하고 있다. [12]의 연구에서는 WSN 필드를 가로지르는 한 직선 영역을 싱크의 데이터 전송을 위해 선정하고 이를 Line이라 부른다. 센서 노드는 자신이 감지한 데이터를 Line에 위치한 노드에게 보낸다. Line에 위치한 노드는 상호간의 통신으로 모바일 싱크의 최근 위치를 유지하고 있으므로, 데이터를 받게 된 라인 내의 노드는 모바일 싱크로 데이터를 전송 할 수 있다. 그러나 Line에 존재하는 노드들의 에너지 소비가 크기 때문에 에너지 핫스팟 문제가 발생할 수 있다. 또한 Line 노드들은 데이터를 단일 홉으로 싱크에게 전달하기 때문에 데이터 전송에 많은 에너지를 소모하는 문제점이 있다. [13]에서는 WSN 필드 중앙으로부터 일정 거리에 존재하는 노드를 링노드로 지정하여, 주기적으로 모바일 싱크의 위치 패킷을 링노드에게 보내는 방식을 사용한다. 링에 속하지 않는 노드들은 싱크에게 데이터를 전달하기 위하여, 먼저 싱크의 위치를 링노드에게 요청한다. [13] 기법은 싱크의 위치를 파악하기 위한 에너지 소모가 적지만, WSN의 크기가 커짐에 따라 싱크의 위치 파악을 위한 오버헤드가 커지는 문제가 존재한다. 다음 아래의 표는 위의 모바일 싱크를 이용한 WSN의 관련 연구를 요약해놓은 표[2]이다.

Table 2. Comparison of Mobile Sink Scheme

Paper Compare	[10]	[11]	[12]	[13]
Mobile sink path method	Static path	Non static path	Static path	Non static path
Routing	Greed	Cluster	Line	Ring

III. Anchor Management Scheme

에너지가 제한되어 있는 드론을 활용한 WSN의 데이터 수집 기법은 드론의 이동거리 제약과 데이터 수집의 효율성을 위하여, 대부분 앵커 노드를 활용하고 있다. 앵커 노드는 앵커 노드의 주변 노드들이 센싱한 데이터를 전달받아 임시적으로 저장하는 역할을 하며, 드론은 이러한 앵커 노드들만을 방문하여 데이터를 수집한다. 이를 효율적으로 수행하기 위하여, 앵커 노드의 선정 및 드론의 이동 경로 결정에 관한 연구가 현재 활발히 수행되고 있다.

다른 선행 연구와는 다르게 본 연구에서, 드론은 데이터 수집 역할 뿐 아니라 무선 전력 전송을 사용하여 센서 노드에게 에너지를 공급해주는 역할도 함께 수행한다. 따라서 본 연구에서는, 드론의 데이터 수집 및 에너지 충전을 위한 효율적인 이동 경로를 결정하고, 이로 인해 확보된 에너지를 각 앵커 노드에 효율적으로 분배하는 기법을 제안한다.

1. Candidate area for anchor nodes

앵커 노드의 에너지 사용은 다른 일반 노드보다 크기 때문에 균형적인 에너지 소모를 위하여 일반적으로 라운드로빈 방식 등을 이용하여 주기적으로 선출한다.

만약 앵커 노드가 선출되는 범위를 센서 필드 전체로 가정하면, 앵커 노드 후보군이 커지게 되어, 보다 많은 앵커 교체 기회가 생기게 된다. 이는 WSN의 작업량 분산에 따른 에너지의 균등 소모라는 장점도 있지만, 제한된 에너지를 가진 드론의 관점에서 보면 이동 경로가 증가하여 드론의 에너지 소모가 커진다는 단점이 있다. 일반적인 드론은 평균 20~30분 정도 정도 비행 할 수 있기 때문에 [14], WSN 필드가 어느 정도 규모가 있을 경우, 이동시간과 충전시간을 감안할 때 전체 필드에 포진된 모든 앵커 노드들의 방문이 불가능하다. 따라서 본 기법에서는 앵커 노드 후보 지역이라는 제한된 지역에서만 앵커 노드가 선출될 수 있게 하였다.

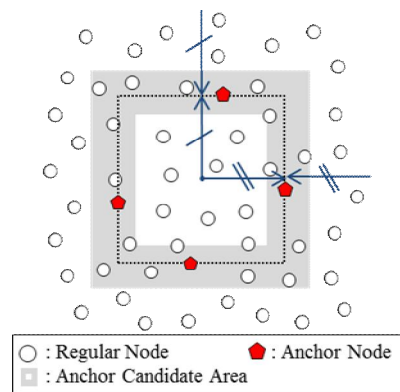


Fig. 2. Candidate area for anchor nodes

앵커 노드 후보 지역 선정 시 주의할 것은 앵커 노드들 뿐 아니라 앵커 노드 후보 지역의 주변 노드들 역시 데이터 전달 역할로 인하여 일반 노드들에 비해 에너지 소모가 크다는 점이다. 앵커 노드의 경우 드론이 충전해 줄 가능성이 있지만, 앵커 노드 후보

지역의 주변 노드들은 드론의 충전 대상이 아니기 때문에, 이러한 노드들이 최대한 균형적으로 에너지를 소모하여 오랜 기간 동작할 수 있도록 앵커 노드 후보 지역을 선정하여야 한다. 만약 앵커 노드 후보 지역이 필드의 어느 한 쪽 방향으로 치우쳐 설정되었다면, 치우친 방향으로 데이터 전달이 집중되어, 특정 노드들의 에너지가 빠르게 소모되고 이는 WSN 수명의 급격한 감소로 이어진다. 따라서 본 논문에서는 [15]을 기반으로, 그림 2와 같이 센서 필드 정중앙과 최외곽 노드 사이의 중간지점을 중심으로 하여, 노드의 무선 전송 거리만큼의 폭으로 앵커 노드 선출 후보 지역(그림 2의 회색영역)을 선정하였다.

2. Energy model of anchor nodes

본 절에서는 앵커 노드의 에너지 모델을 설명한다. 이는 드론의 최적 이동 경로 및 각 앵커 노드에게 분배할 최적의 에너지량을 결정하기 위하여 필요하다.

앵커 노드는 주변 센서 노드들의 데이터를 모은 뒤, 드론이 통신 범위에 방문할 때 데이터를 전송해준다. 따라서 드론이 방문하기 전까지 앵커 노드가 blackout이 되지 않아야 된다. 본 연구에서는 균형적인 노드의 배치를 가정하고 있어, 구역 별로 할당된 노드의 개수가 거의 비슷하며, 각 앵커 노드들이 주변 노드로부터 수집하는 데이터의 양은 거의 같다는 것을 가정한다. 드론의 방문주기(라운드) 동안 각 센서 노드들이 수집한 데이터의 총량을 D_{round}^{total} 라고 한다면, 앵커 노드들이 수집한 데이터의 총량의 최대값은 D_{round}^{total} 이다. 앵커 노드의 개수가 N_{anchor} 이고, 앵커 노드가 단위 데이터를 받을 때 소모하는 에너지를 E_{recv}^{anchor} 라고 한다면, 라운드 당 한 앵커 노드가 센싱 한 데이터를 받기 위해서 필요한 에너지 E_{recv}^{anchor} 는 다음 수식 (1)과 같이 예측할 수 있다.

$$E_{recv}^{anchor} = \frac{D_{round}^{total} E_{recv}^{unit}}{N_{anchor}} \quad (1)$$

또한, 데이터 수집 및 충전에 필요한 드론과 앵커 노드와의 최소거리를 d_{anchor}^{drone} 라고 한다면, 드론에게 한 앵커 노드가 현재 라운드의 데이터를 전송할 때, 필요한 에너지 E_{trans}^{anchor} 는 아래 수식 (2)과 같이 계산될 수 있다. 여기서 α 는 전송 환경에 따라 2이상의 값을 갖는 자연수인 경로 손실 값이며, β 는 1비트 데이터를 1미터 거리로 전송하는데 소비되는 에너지이다[16].

$$E_{trans}^{anchor} = \beta \left(\frac{D_{round}^{total}}{N_{anchor}} \right) (d_{anchor}^{drone})^\alpha \quad (2)$$

마지막으로, 한 라운드 동안 앵커 노드로써 데이터 송수신과는 별개로 사용되는 에너지를 E_{sys}^{anchor} 라고 하면, 각 앵커 노드가 한 라운드 동안 앵커 노드의 역할을 수행하기 위해 필요한 에너지는, 모든 노드가 아래 수식 (3)과 같이 예측할 수 있다.

$$E_{anchor} = E_{recv}^{anchor} + E_{trans}^{anchor} + E_{sys}^{anchor} \quad (3)$$

한편, 앵커 노드 i 가 라운드로빈 등의 기법을 통해 앵커노드가 아닌 일반노드로 동작하기 위해 필요한 에너지를 $E_{regular}(i)$ 라고 할 때(참고로 $E_{regular}(i)$ 는 각 노드가 자신의 이전까지의

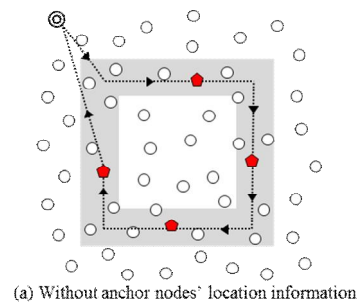
데이터에 근거하여 찾아낼 수 있다.), 앵커 노드 i 가 이번 앵커 노드의 역할을 마치고 일반노드로 동작하다가 다시 앵커 노드로 선출되었을 때 blackout없이 동작하기 위해 필요한 $E_{threshold}^{anchor}(i)$ 는 수식 (4)와 같이 예측할 수 있다.

$$E_{threshold}^{anchor}(i) = E_{anchor} + \theta E_{regular}(i) \quad (4)$$

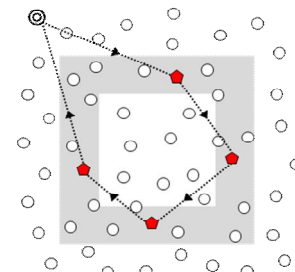
여기서 θ 는 각 앵커 후보 노드가 앵커가 되는 평균 라운드 수를 의미하는데, 이는 앵커 선출 기법 및 네트워크 크기에 의존적이다. 수식 (4)를 통해 드론은 앵커 노드 i 가 추후 앵커 노드로 선출될 때 까지, 그리고 선출되어 앵커 노드로써 blackout 없이 동작할 때까지 필요한 최소한의 에너지량을 계산할 수 있고, 이를 앵커 노드 i 의 에너지 문턱값이라고 부른다.

3. Sharing the information of anchor nodes

드론이 앵커 노드를 방문하여 데이터 수집을 위해서는 그림 3(a)처럼, 앵커 노드 후보 지역을 순회하면서 앵커 노드를 찾아 다녀야 한다. 그러나 만약 드론이 앵커 노드들의 위치정보를 알고 있다면, 그림 3(b)와 같이 최적 경로를 이동 전에 미리 찾을 수 있다. 본 연구에서도 이러한 접근 방법을 기반으로 하고 있지만, 제안기법은 드론의 이동거리 최소화와 동시에 앵커 노드들에 대한 드론의 효율적인 에너지 공급을 목표로 하고 있기 때문에, 앵커 노드들의 위치 정보만으로는 최소 이동 경로를 찾을 수 있지만, 아래의 문제를 풀기에는 어려움이 있다.



(a) Without anchor nodes' location information



(b) With anchor nodes' location information



Fig. 3. Change of drone's path according to the presence of location information of anchor nodes

● 에너지 공급의 적시성 문제 : 이동 경로 뒤 부분에 위치한 앵커 노드들의 에너지 충전이 매우 시급함에도 불구하고, 최소 이동 경로로 방문하게 된다면, 에너지가 부족한 앵커 노드들은

드론이 방문할 때 까지 blackout 되어 다시 충전될 때까지 센싱 및 주변노드들로부터의 데이터 수집을 중단할 수밖에 없다. 따라서 최소이동경로가 에너지 공급의 관점에서 최적이동경로는 아니다.

- 에너지 분배 형평성의 문제 : best-effort 방식으로 에너지를 분배하여, 방문하는 노드마다 배터리를 완충해준다고 하면, 뒤에 방문할 앵커 노드들은 에너지 충전을 충분히 받지 못하여 blackout될 가능성이 크다.

- 드론의 에너지 사용 최대화 문제 : 위와는 반대로 최소 이동경로의 뒤 부분에 있는 노드들의 충전을 대비하기 위해 앞쪽에 있는 노드들에게 충전시키는 에너지의 양을 줄이게 되면, 결과적으로 모든 앵커 노드의 순회 후 드론의 최종 에너지가 남게 되는 경우도 있다.

이를 개선하기 위해서 다음 라운드에 선출될 앵커 노드의 위치 및 에너지 정보까지 현재 앵커 노드에 전달한다. 여기에서 에너지 정보는 현재 잔여 에너지양 $E_{current}^{anchor}(i)$ 및 자신이 일반 노드로 동작할 때 필요한 시스템 에너지 $E_{regular}(i)$ 를 포함한다.

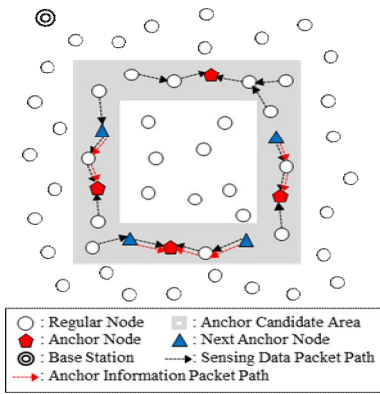


Fig. 4. Sharing Information about location and energy of next anchor node

그림 4는 다음 라운드에 앵커 노드로 선출된 노드가 자신의 위치 및 에너지 정보가 담긴 상태 패킷을 현재 라운드의 앵커 노드에 전달하는 모습을 보여준다. 현재 앵커 노드에 전달하는 데이터 패킷 경로를 그대로 사용하여, 자신이 다음 라운드의 앵커 노드라는 정보와 함께, 상태 패킷을 현재 앵커 노드에 전달한다. 이후 드론이 현재 라운드의 앵커 노드를 방문하여, 센싱 데이터의 수집과 함께 다음 라운드 앵커 노드들의 정보도 함께 수집한다.

4. Optimal path of a drone for energy supply

다음 라운드 시작 전에, 드론은 수집된 다음 앵커 노드들의 에너지 상태 및 위치 정보를 활용하여, 다음 라운드를 위한 에너지 공급 측면에서 최적의 경로를 찾을 수 있다.

이를 위해, 드론은 자신이 방문해야 할 앵커 노드 i 의 에너지 잔량 $E_{expected}^{anchor}(i)$ 을 아래 수식 (5)를 사용하여 미리 예측한다. 여기서 $E_{current}^{anchor}(i)$ 는 한 라운드 전에 수집한 앵커 노드 i 의 잔여 에너지양이다.

$$E_{expected}^{anchor}(i) = E_{current}^{anchor}(i) - E_{anchor} \quad (5)$$

드론은 이번 주기 경로 선택 시에, 수식 (5)을 사용하여 예측한 에너지 잔량이 없거나 매우 작은($\ll \alpha$) 노드들을 우선 방문한다. 이를 위해, 위치정보만을 고려한 최단경로 알고리즘(예, Dijkstra 알고리즘)을 약간 변형하여, 특정 노드들(에너지 잔량이 매우 작은 노드들)을 우선 방문하는 변형된 최단경로 알고리즘을 적용한다. 예를 들어, 그림 5에서 앵커 노드 N1은 잔여 에너지 양이 매우 적은 노드로 가정하였다. 따라서 드론의 앵커 노드 방문 경로가, 위치정보만 반영했을 때(그림 5(a))와 비교하여 달라지는데, 이는 앵커 노드 N1을 우선 방문하는 것이 많은 데이터의 수집을 위하여 유리하기 때문이다.

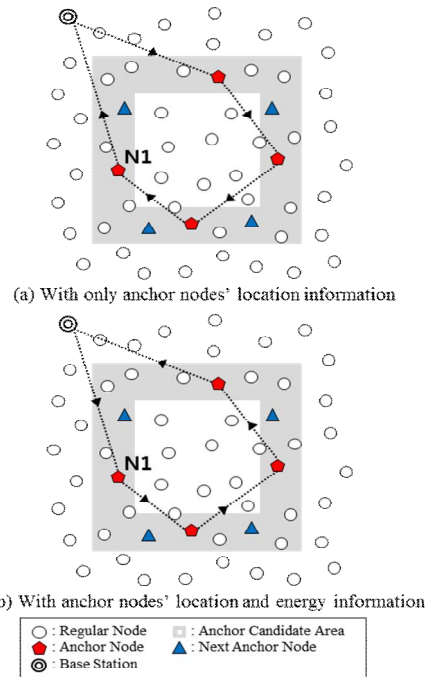


Fig. 5. Change of drone's path according to location and energy information sharing

5. Algorithm for Determining the amount of energy charging to each anchor node

본 절에서는 수집된 앵커 노드의 위치 및 에너지 정보를 활용하여, 에너지 분배 형평성의 문제와 드론의 에너지 사용 최대화 문제를 해결하여 각 앵커 노드에게 전달해야 할 최적의 에너지량을 결정하는 기법을 소개한다.

드론의 에너지($E_{capacity}^{drone}$)는 다음과 같이 크게 네 가지를 위하여 사용된다. ① 각 앵커 노드를 방문하기 위한 움직임에 필요한 에너지 (E_{moving}^{drone}), ② 움직임과 관계없이 기본적으로 드론이 동작하는데 필요한 에너지(E_{sys}^{drone}), ③ 데이터를 수집하기 위해 필요한 에너지 ($D_{round}^{total} E_{recv}^{unit}$), ④ 마지막으로, 앵커 노드들을 충전하기 위한 에너지(E_{charge}^{drone})이다. 따라서 드론이 앵커 노드에게 충전해줄 수 있는 에너지(E_{charge}^{drone})는 아래 수식 (6)을 사용하여 예측할 수 있다.

$$E_{charge}^{drone} = E_{capacity}^{drone} - E_{moving}^{drone} - E_{sys}^{drone} - D_{round}^{total} E_{recv}^{unit} \quad (6)$$

이 중에서 E_{moving}^{drone} 은 3.4절에서 찾은 최적 경로의 거리를 이용해 도출할 수 있으며, E_{sys}^{drone} 도 드론의 평균속도와 최적 경로의 거리를 사용하여 최적 경로를 모두 방문하는데 걸리는 시간을 계산함으로써 도출할 수 있다. 또한 $E_{capacity}^{drone}$ 는 드론의 스펙에서 찾을 수 있다.

기본적으로 드론은 방문하는 앵커 노드 i 에게 적어도 $E_{threshold}^{anchor}(i) - E_{expected}^{anchor}(i)$ 의 에너지를 분배해야 한다. 이는 앵커 노드 i 가 일반 노드로 동작하다가 추후 다시 앵커로 선출된 후, blackout이 되지 않고 동작하기 위해 필요한 에너지양이다. 모든 앵커 노드에 대하여 위와 같이 계산 하여, 앵커 노드들에게 반드시 필요한 에너지의 총량, 즉 드론이 이번 라운드에 모든 앵커 노드들에게 분배해 주어야 하는 필수 에너지의 총량 ($E_{threshold}^{total}$)을 수식 (7)와 같이 계산할 수 있다.

$$E_{threshold}^{total} = \sum_{i=1}^{N_{anchor}} E_{threshold}^{anchor}(i) - E_{expected}^{anchor}(i) \quad (7)$$

단, 수식 (7)에서 $E_{expected}^{anchor}(i) < 0$ 이면 $E_{expected}^{anchor}(i)$ 값은 0으로 취급한다.

$$E_{charge}^{drone} > E_{threshold}^{total} \quad (8)$$

만약 드론의 E_{charge}^{drone} 가 위의 수식 (8)을 만족한다면, 이는 앵커 노드들이 필요로 하는 모든 에너지를 드론이 배분할 수 있고, 배분 후에도 남은 에너지양이 존재한다는 의미이다. 따라서 이 경우 남은 에너지양을 앵커 노드들에게 추가적으로 고루 배분하여 충전량을 결정한다. 이 경우 드론이 앵커 노드 i 에게 분배하는 에너지는 아래 수식 (9)과 같다.

$$E_{threshold}^{anchor}(i) - E_{expected}^{anchor}(i) + \left(\frac{E_{charge}^{drone} - E_{threshold}^{total}}{N_{anchor}} \right) \quad (9)$$

결과적으로, 각 앵커 노드 i 는 자신의 에너지 문턱값 $E_{threshold}^{anchor}(i)$ 이상의 잔여 에너지양을 갖게 될 것이다.

그러나 만약, 수식 (8)을 만족하지 못하는 경우에는 모든 앵커 노드를 에너지 문턱값까지 충전해줄 수 없다. 이 경우 두 가지의 선택이 있을 수 있는데, ① 모든 앵커 노드들에게 드론의 에너지를 공평하게 배분하는 방법과 ② best-effort 방식으로 에너지를 배분하여 일부 앵커라도 에너지 문턱값 만큼의 에너지를 갖게 하는 방법이다. ①의 전략을 택한다면 에너지를 고르게 배분할 수 있으나, 모든 노드가 충전 후에도 에너지 문턱값 미만의 에너지를 갖게 되어 추후 앵커 노드로 동작할 시에 blackout 상태가 될 가능성이 높다. 반대로 ②의 전략은 추후 앵커 노드로 동작하는 동안 정전될 가능성이 있는 노드의 개수는 최소화할 수 있으나, 특정 노드들은 에너지 문턱값에 훨씬 못 미치는 에너지를 갖게 된다. ①의 단점은 추후 그 노드들이 앵커로 선출되어 동작되는 동안에 blackout 될 수는 있지만, 드론이 바로 방문하여 에너지 문턱값까지 충전을 해주기 때문에, 이후에는 문제가 되지 않을 가능성이 높다. 그러나 ②의 전략을 택한다면 문턱값에 훨씬 못 미치는 노드들이 존재하게 되고, 이는 그 노드들은 앵커로 선출될 가능성이 매우 낮아진다. 따라서 이들 노드들을 제외한 앵커 후보노드들이 계속하여 앵커로 동작할 확률이 높아지게 되고, 그들 노드 주변의 (앵커 노드 후보

지역 외에 있는) 노드들이 데이터 전달로 인한 에너지 소모가 높아져 빨리 blackout 된다. 이 노드들은 충전을 받을 수도 없기 때문에, 결과적으로 WSN 전체 수명을 급격히 감소시킨다. 따라서 우리는 앵커 후보 노드의 개수를 최대한으로 유지하고자 ①의 전략을 선택하였다. 그림 6의 의사 코드는 현재까지 설명한, 각 앵커 노드에 대한 드론의 에너지 충전량 결정 알고리즘을 보여준다.

제안하는 드론의 경로 최적화 및 앵커 노드의 충전량 결정 기법을 위해 필요한 오버헤드는 현재 앵커 노드에 다음 앵커 노드로 선출된 노드들이 자신의 위치 및 에너지 정보를 전달하는 것뿐이다. 라운드 당 새로 선출된 앵커 노드 하나가 하나의 정보패킷을 현재 앵커에 보내는 것이므로 오버헤드가 거의 없다고 할 수 있다.

Algorithm 1 Determining the amount of charging energy for each anchor

```

01:  $E_{moving}^{drone}$ ,  $E_{charge}^{drone}$  and  $E_{threshold}^{total}$  are initialized to zero.
02: For  $i = 1$  to  $N_{anchor}$ 
03:    $LOCATION_{anchor}$  is changed to the location for
      the next anchor node in the optimal path.
04:    $E_{moving}^{drone} += E(Distance(LOCATION_{drone}, LOCATION_{anchor}))$ 
05:    $LOCATION_{drone} = LOCATION_{anchor}$ 
06: end For
07:  $E_{moving}^{drone} += E(Distance(LOCATION_{drone}, LOCATION_{base\_station}))$ 
08:  $LOCATION_{drone} = LOCATION_{base\_station}$ 
09:  $E_{charge}^{drone} = E_{capacity}^{drone} - E_{moving}^{drone} - E_{sys}^{drone} - D_{round}^{total} \cdot P_{unit}$ 
10: For  $i = 1$  to  $N_{anchor}$ 
11:    $E_{threshold}^{total} = (E_{threshold}^{anchor}(i) - E_{expected}^{anchor}(i))$ 
12: end For
13: if  $E_{charge}^{drone} \geq E_{threshold}^{total}$  then
14:    $E_{extra} = \frac{E_{charge}^{drone} - E_{threshold}^{total}}{N_{anchor}}$ 
15: For  $i = 1$  to  $N_{anchor}$ 
16:   if  $E_{charge}^{drone} \geq E_{threshold}^{total}$  then
17:      $E_{charging}(i) = (E_{threshold}^{anchor}(i) - E_{expected}^{anchor}(i)) + E_{extra}$ 
18:   else
19:      $E_{charging}(i) = E_{charge}^{drone} / N_{anchor}$ 
20:   end if
21: end For

```

Fig. 6. Algorithm for determining the amount of energy charging to each anchor node

IV. Performance Evaluation

본장에서는 제안 기법의 성능 검증을 위한 실험 환경 및 결과를 분석한다. 성능 측정을 위하여 Castalia[17] 시뮬레이터를 이용하였다.

1. Experimental environments

배터리 기반의 센서 노드와 재충전 가능 앵커 노드들을 대상으로 실험을 진행하였다. 각 노드들을 균형적으로 배치하였고, 앵커 노드 및 일반 센서 노드의 개수를 변경하며 다양한 WSN 환경을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 실험에서는 아래의 총 3가지의 기법을 비교 분석하였다. ① 드론이 앵커 후보 범위를 고정된 경로로 순회하면서 앵커 노드들을 찾아내어 방문하는 기법(static path

scheme), ② 드론이 현재 앵커 노드의 위치 정보를 미리 파악하여 최소 경로로 방문하는 기법 (anchor-location sharing scheme) [15], 마지막으로는 ③ 본 논문에서 제안하는 기법(proposed scheme)이다. 자세한 실험 환경은 표 3에 기술하였다.

Table 3. Experimental environment

Parameter	Value
Experimental time	15 days
Length of round	2 hours
Size of field	750×750 m ²
Number of nodes	500 ~ 2000
Battery capacity of a node	2000 mAh
Sensing data size	44 bytes
Transmission range	10 ~ 30 m
Data transfer rate	250 kbps
RX Energy	6.5 mW
TX Energy	5.9 mW
Battery capacity of drone	4480 mAh
Speed of drone	10 m/s

2. Performance evaluation by changing the number of anchor nodes

그림 7과 그림 8는 노드의 개수가 1500개일 때, 앵커 노드 개수의 변화에 따른 정전 노드와 수집 데이터양을 비교한 그래프이다.

고정 경로 탐색 기법에서는 드론의 에너지가 많은 부분 앵커 노드의 탐색을 위하여 소모되기 때문에, 앵커 노드를 충전하기 위한 에너지가 부족하게 된다. 그러나 앵커 노드의 개수가 증가할수록 앵커 노드 주변의 에너지 핫스팟 문제의 완화로 인해 정전 노드 개수가 조금씩 감소하는 것을 볼 수 있다.

위치정보 공유기법은 최소경로를 사용하여 앵커들을 방문하므로 고정 경로 기법보다는 성능이 좋으나, 제안 기법보다는 좋지 않은 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 두 가지로 유추되는데, 하나는 충전량 결정 기법의 단점 때문이고, 또 하나는 최소 거리 방문 경로가 공급의 측면에서 최적의 경로가 아닐 수 있기 때문이다. 즉, 드론이 앵커 노드에 방문한 순서대로 앵커 노드의 에너지를 가득 충전 해주기 때문에, 앞서 방문한 앵커 노드에는 과한 에너지가 공급되지만, 후반부에 탐색한 앵커 노드는 에너지를 적게 공급받거나 전혀 공급받지 못해, 한 라운드를 버티지 못하고 정전 노드가 될 가능성이 발생한다. 특히 앵커 노드의 개수가 25개 이상일 때부터는 방문할 앵커 수가 증가하고 드론의 이동거리가 많이 늘어남에 따라, 위의 두 가지 문제가 발생할 가능성이 높아져서, 정전 노드의 개수가 크게 늘고 및 수집 데이터의 양이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

제안 기법은 앵커의 수와 상관없이 다른 기법들보다 좋은 효율이 나오는 것을 확인할 수 있고, 특히 앵커 노드 수가 25개일 경우, 가장 큰 성능 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 다만, 앵커 노드의 개수가 15개 이하 일 때에는 위치정보 공유 기법에 비해 큰 효율을 보이지 못하고 있는데, 그 이유는 앵커 노드가 필요한 에너지를 드론이 충분히 충전해 줄 수 있기 때문이다. 또한 앵커 노드가 30개 이상일 경우에는 제안 기법에서도 정전 노드의 개수가

많이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 드론이 방문해야 하는 거리가 증가함에 따라 충전 에너지양이 부족해지기 때문이다. 그러나 모든 앵커 노드의 수에서 제안된 기법이 정전노드 수 및 데이터 수집량 면에서 가장 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

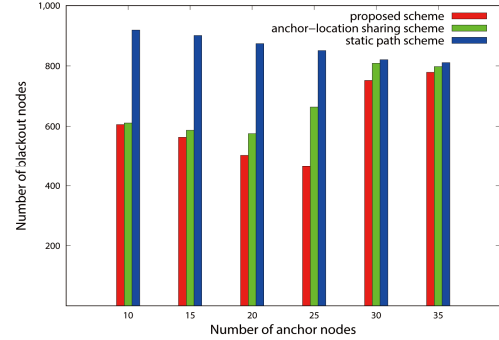


Fig. 7. The number of blackout node according to the number of anchor nodes

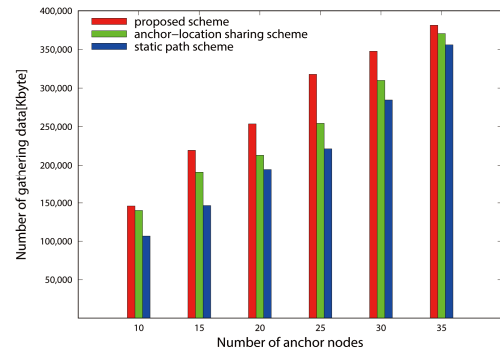


Fig. 8. The amount of gathered data according to the number of anchor nodes

3. Performance evaluation over time

그림 9과 그림 10는 노드의 개수가 1500개일 때 앵커 노드를 25개의 상황에서, 시간에 따른 정전 노드 개수와 수집 데이터를 비교한 그래프이다.

정전 노드 그래프를 살펴보면, 위치정보 공유 기법의 경우, 초기 라운드 일 때는 앵커 노드 선정 구역에 있는 노드들이 에너지 소모가 크지 않기 때문에, 정전 노드가 발생하지 않는 것을 볼 수 있으나, 150라운드 이상부터는 정전 노드의 개수가 급격하게 증가하는 것을 파악할 수 있다. 이는 드론이 충전해줄 수 있는 충전량보다, 앵커 노드가 필요로 하는 에너지양이 더 많아지면서, 앵커 노드 후보 지역에 위치하는 노드들이 점차적으로 정전 노드가 되기 때문이다. 이로 인해 앵커 노드 후보 지역에 존재하는 노드의 개수가 줄어들면서 에너지 핫스팟 문제가 가속화되기 시작하여 150라운드 부근에서 그래프의 기울기가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 데이터 수집 양 그래프에서도 확인할 수 있다. 전체적으로, 제안 기법도 비슷한 경향을 보이지만 가장 늦게 핫스팟 문제가 발생하고, 상대적으로 가장 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

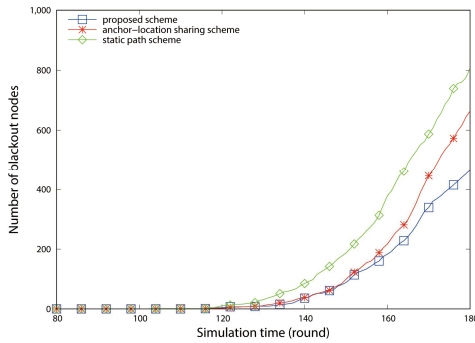


Fig. 9. Number of blackout nodes over time

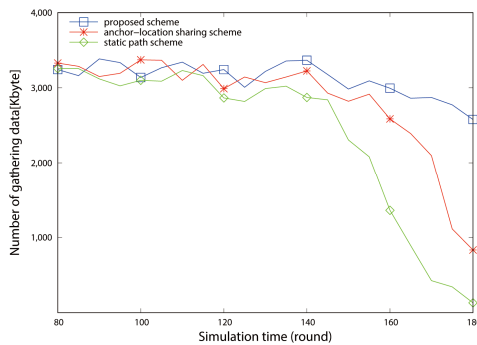


Fig. 10. Amount of gathered data over time

4. Scalability evaluation

제안 기법의 확장성을 검증하고자, 네트워크 규모, 즉 노드 개수에 따른 정전 노드와 수집 데이터양을 측정하였고, 그림 11와 그림 12에 이를 나타내었다.

노드 개수가 500개일 경우에는 앵커 후보 지역에 존재하는 노드도 많지 않다. 따라서 드론이 충분히 많은 앵커들을 충전할 수 있기 때문에, 정전 노드의 개수 및 수집 에너지양에서 기법들의 차이가 크게 차이나지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 노드의 개수가 커질수록 제안 기법과 다른 기법과의 성능 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다.

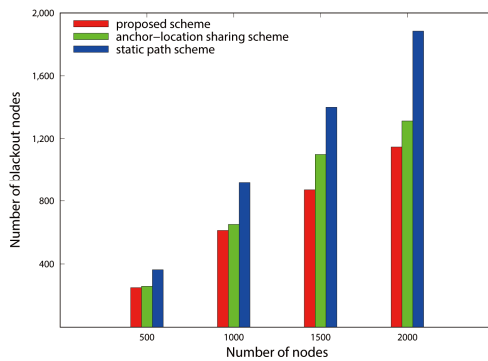


Fig. 11. The number of blackout node according to the number of nodes

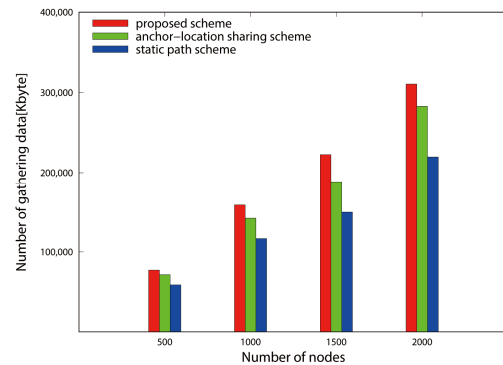


Fig. 12. The amount of gathered data according to the number of nodes

IV. Conclusions

본 연구에서는 고정된 싱크 노드를 사용한 WSN에서 문제가 되었던 에너지 불균형 문제를 해결하고자, 무선 충전이 가능한 모바일 싱크를 사용하였다. 대부분의 기존 논문에서는 무한한 에너지를 가정으로 모바일 싱크를 운영하고 있다. 하지만 사람의 관리가 힘든 곳이거나, 사람이 관리하기에 위험한 지역에서 WSN을 사용하기에는 위의 가정은 불가능하고, 유한한 에너지를 가지고 있는 무인 항공기, UAV 등의 물체를 모바일 싱크의 모델로 적용시켜야한다. 그렇기 때문에 기존의 기법들을 적용시킬 수 없기에 본 논문에서는 제한된 에너지를 가지는 모바일 싱크를 효율적으로 사용하고, 앵커 노드들의 위치 및 에너지 정보를 활용하여 에너지 충전을 위한 최적의 경로를 설정하고, 아울러 각 앵커에 충전할 최적의 에너지양을 결정하는 알고리즘을 제안하였다. 본 제안 기법에서는 다음 라운드에 앵커 노드로 선출된 노드들의 정보를 현재 라운드의 앵커 노드들에게 전달하게 함으로써, 모바일 싱크가 현재 라운드의 앵커 노드 방문 시, 그들의 정보를 미리 파악하도록 하였고, 이를 통해 다음 라운드에 앵커 노드를 방문할 때 미리 최적 경로 및 최적 에너지양을 결정할 수 있었다. 제안된 기법은 낮은 오버헤드로 기존의 앵커 노드 에너지 충전 기법들보다 WSN의 수명 및 성능을 월등히 향상시킴을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless Sensor Network Survey," *Computer networks*, Vol. 52, No. 12, pp. 2292-2330, Aug, 2008.
- [2] Khan, J. Ahmed, H. K. Qureshi, and A. Iqbal, "Energy management in wireless sensor networks: A survey," *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 41, pp. 159-176, Jan, 2015.

- [3] Mou, Xiaolin, and H. Sun. "Wireless power transfer: Survey and roadmap," 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference, pp. 1-5, May, 2015.
- [4] Z. Jian, T. Jian, W. Tianbao, and C. Fei, "Energy-efficient data-gathering rendezvous algorithms with mobile sinks for wireless sensor networks," *International Journal of Sensor Networks*, Vol. 23, No. 4, pp. 248-257, Apr, 2017.
- [5] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks," In *Proceedings of Hawaiian International Conference on Systems Science*, pp. 10-pp, Jan, 2000.
- [6] Tamura, Yuya, K. Toyoda, and I. Sasase, "Closer Destination Selection Scheme for Mobile Sink and Charger Enabled WRSNs," 2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference(CCNC), pp. 125-130, Jan, 2016.
- [7] Y. Yuanyuan, W. Cong, G. Songtao, "Joint Mobile Data Gathering and Energy Provisioning in Wireless Rechargeable Sensor Networks," *IEEE Computer Society*, Vol. 13, Issue. 12, pp. 2836-2852, Feb, 2014.
- [8] S. Chen, Y. Shu, Y. Bihan, L. Chao, S. Zhiguo, and C. Jiming, "Mobile Wireless Charging and Sensing by Drones," *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services Companion*, pp. 99-99, Jun, 2016.
- [9] C. Tunca, S. Isik, M. Y. Donmez, and C. Ersoy, "Distributed Mobile Sink Routing for Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 877-897, Second Quarter, 2014.
- [10] H. Luo, F. Ye, J. Cheng, S. Lu, and L. Zhang, "TTDD: Two-tier data dissemination in large-scale wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 11, No. 1, pp. 161-175, Jan, 2005.
- [11] C.-J. Lin, P.-L. Chou, and C.-F. Chou, "HCDD: Hierarchical clusterbased data dissemination in wireless sensor networks with mobile sink," in *Proc. 2006 int. conf. on Wireless communications and mobile computing. IWCMC '6*, pp. 1189-1194, Jul, 2006.
- [12] E. Ben Hamida, and G. Chelius, "Line-based data dissemination protocol for wireless sensor networks with mobile sink," in *IEEE Int. Conf. on Communications*, 2008. ICC '8, pp. 2201-2205, May, 2008.
- [13] Tunca, C., Isik, S., Donmez, M. Y., & Ersoy, C. Ring routing: An energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks with a mobile sink. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 14, No. 1, pp. 947-1960, Sept, 2015.
- [14] J. Zhou, B. Zhang, W. Xiao, D. Qiu and Y. Chen, "Nonlinear Parity-Time-Symmetric Model for Constant Efficiency Wireless Power Transfer: Application to a Drone-in-Flight Wireless Charging Platform," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 4097-4107, May 2019.
- [15] K. Park, D. Noh, and I. Yoon, "Anchor Location Sharing Scheme for Efficient Use of a Mobile Sink Capable of Wireless Power Transmission in Sensor Networks," in *Proceedings of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, pp. 137-138, Jul, 2018.
- [16] T. Melodia, D. Pompili, and I.F. Akyildiz, "Optimal Local Topology Knowledge for Energy Efficient Geographical Routing in Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 1705-1716, Mar, 2004.
- [17] The Castalia simulator for Wireless Sensor Networks, <http://castalia.npc.nicta.com.au>

Authors



Kyoungnam Park received the B.S. degree in Electronic Engineering from Soongsil University, Korea, in 2017. He is currently a M.S. student in Department of Software Convergence at Soongsil University. His research interests include wireless sensor

network, cyber physical system, embedded system software, and ubiquitous sensor network.



Ikgune Yoon received the Ph.D. degree in Computer Science and Engineering from Seoul National University, Korea, in 2016. He is currently an assistance professor in Department of Smart Systems Software at Soongsil University. His research interests

include wireless sensor network and embedded system software.