

에너지 수집형 무선 센서 네트워크에서 무선 전력 전송을 이용한 병합 노드 관리

윤익준*

Aggregation Nodes Management Using Wireless Power Transfer for Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks

Ikjune Yoon*

요약

본 논문에서는 에너지 수집형 센서 노드를 이용한 무선 센서 네트워크에서 드론을 모바일 싱크로 활용하여 데이터를 수집할 때, 핫 스팟 문제를 해결하고 네트워크 연결성을 향상시키기 위해, 데이터를 임시로 모으는 병합 노드를 선정, 관리하고, 무선 전력 전송을 이용하여 에너지를 전달하는 기법을 제안한다. 이 기법에서는 싱크 노드가 고정된 경로를 순회하고, 이 경로에서 일정 수의 노드를 병합 노드로 선정한다. 드론은 이 병합 노드를 방문하여 데이터를 수집하고, 동시에 드론의 남은 에너지를 병합 노드에 공급해 줌으로써 병합 노드가 에너지 부족으로 정전 상태가 되는 문제를 완화시켰다. 그 결과, 병합 노드를 포함한 핫 스팟 지역 센서 노드들의 정전이 감소하고, 네트워크의 가용성이 증가함으로써 데이터 수집 및 모니터링 성능이 증가했다.

Key Words : wireless sensor network, wireless power transfer, energy-harvesting, drone, mobile sink node

ABSTRACT

In this paper, we propose a scheme that elects and manages aggregation nodes that gather sensory data temporarily to solve the hot-spot problem and improve network connectivity in case that a drone that can transfer energy wirelessly is used as a sink node in energy-harvesting wireless sensor networks. In this scheme, the drone traverses the network along a predetermined path, and the certain number of nodes on the sink node movement path are selected as the aggregation nodes. The drone visits them to collect data, and at the same time supplies the residual energy of the drone to the aggregation nodes not to become blackout. As a result, the number of blackout nodes in hot-spot area including aggregation nodes has been significantly reduced, and the amount of data collected and monitoring performance has increased by improved network availability.

I. 서론

무선 센서 네트워크는 사람이 접근하기 힘든 지역이나, 광범위한 지역에서의 환경을 모니터링하기 위한 기법으로 각광받고 있다^[1,2]. 무선 센서 네트워크에서

는 다수의 작은 무선 센서 노드를 사용하여 환경 정보를 수집하는데, 일반적으로 배터리로 동작하기 때문에 수명이 짧은 문제가 있다. 따라서 네트워크를 유지하기 위해서는 노드의 배터리를 교환 하거나 새로운 노드로 교체해줘야 한다. 이를 극복하기 위해 에너지

* 이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2018R1D1A1B07042943)

• First Author : Soongsil University Department of Smart Systems Software, Ikjune.Yoon@gmail.com, 정회원
논문번호 : 201905-088-B-RU, Received May 23, 2019; Revised June 11, 2019; Accepted June 12, 2019

소모를 최소화하는 기술들이 현재까지 활발히 연구되고 있다³⁾.

센서 노드의 제한된 에너지 문제를 해결하기 위한 한 방법으로 환경 에너지를 수집하여 배터리를 충전하는 에너지 수집형 센서 노드를 사용하는 방식이 있다. 하지만 이러한 에너지는 환경의 변화에 영향을 많이 받기 때문에 센서 노드에 안정적으로 에너지를 공급하기 어렵다. 또한, 최근의 센서들은 사진, 영상 등의 대용량 데이터를 전송함에 따라 전송 에너지 소모가 급격히 증가하여, 환경 에너지로 센서 노드의 에너지 요구량을 만족시키기에 어려움이 있다.

에너지 부족 문제를 해결하기 위한 두 번째 방법으로 원거리에서 에너지를 전송하는 무선 전력 전송이 있다^{4,5)}. 센서 노드에 무선으로 에너지를 공급하기 위해 자동차, UAV 등에 충전기를 장착하여 이동하며 충전해주는 방식이 사용되고 있으며^{5,6)}, 효율적으로 에너지를 공급하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다^{7,8)}. 자동차를 이용한 경우 고사양의 충전기를 장착할 수 있지만 길이 있는 곳만 이동할 수 있기 때문에 운용 환경에 제약이 많이 받는다. 이를 해결하기 위해 드론을 이용한 에너지 전송 기법이 연구되었다⁹⁾. 드론을 이용 경우 공중으로 이동함으로써 지형지에 영향을 받지 않고 이동이 가능하지만, 운반 무게의 한계로 인하여 운송 장비의 무게에 제약이 발생하고, 제한된 배터리로 인해 비행시간의 한계가 존재하여 효율적인 이동경로나 배터리 관리 기법이 필요하다^{6,10)}.

무선 센서 네트워크에서의 또 다른 문제점은 데이터가 몰리는 핫 스팟에서 노드의 에너지 소모가 커지는 것이다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 직접 싱크 노드가 센서 노드들을 방문하여 이를 수거하는 모바일 싱크를 이용한 방법이 있다¹¹⁾. 일반적으로 싱크 노드가 모든 노드를 방문할 수 없기 때문에 데이터를 몇몇 병합 노드에 모으고 싱크 노드가 이들만 방문하여 수거하는 방식을 사용한다. 그럼에도 불구하고 병합 노드의 주변에서 핫 스팟 문제가 발생할 수 있다. 병합 노드 주변의 노드들이 동작하지 않으면, 그 노드를 거치는 모든 데이터가 유실되기 때문에 데이터 손실이 커질 수 있고, 대체 노드가 없을 경우 정상적인 네트워크 운영이 불가능하게 된다. 따라서 이러한 병합 노드 주변의 핫 스팟에서 노드의 정전을 줄이기 위한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 무선 전력 전송이 가능한 드론을 모바일 싱크로 사용하는 에너지 수집형 무선 센서 네트워크에서, 병합 노드를 선정, 관리하고 에너지를 전달해줌으로써 핫 스팟 문제를 완화시키고 네트워크

연결성을 향상시키는 기법을 제안한다.

II. 관련 연구

무선 센서 네트워크의 에너지 문제를 해결하기 위해 무선 전력 전송을 활용하는 방법들이 연구되고 있다^{4,5)}. [8,12]에서는 기지국에서 전자기파를 송출하는 방식으로 센서 네트워크에 전력을 전송하는 방법을 제안했다. [6,13]에서는 자동차를 이용한 무선 전력 전송을 하는 방법을 제안했다. 그 중, [13]에서는 SenCar라는 무선 전력 전송이 가능한 차를 모바일 싱크로 활용하여, 노드들에게 에너지를 전달하고 앵커 노드에서 데이터를 수집하는 기법을 제안하였다. [9]에서는 드론을 이용하여 전원 공급 및 데이터를 수거하는 모바일 싱크 DSENSE를 제안하고, 실제 환경에서 드론을 이용한 데이터 수집과 무선 전력 전송이 가능 여부를 확인했다. 실험 결과 드론을 이용한 모바일 싱크에서 무선 전력 전송이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

일반 배터리 기반이 아닌 에너지 수집형 센서 네트워크에서도 부족한 에너지를 보충하기 위한 용도로 무선 전력 전송 기술을 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. [14]에서는 태양 에너지를 수집하는 노드에 무선 전력 전송 기능을 추가한 기기를 설계하였다. [15]에서는 에너지 수집 노드와 배터리 기반 노드로 구성된 네트워크에서 무선 전력 전송을 활용하는 3계층 구조 운영 기법을 제안했다. 이 기법에서는 에너지 소모가 큰 클러스터 헤드에 에너지를 충전해줌으로써 네트워크의 연결성을 증가시켰다. [16]에서는 에너지 수집 노드와 드론을 이용한 무선 전력 전송이 가능한 환경에서 무선 전력 전송량과 드론의 이동 경로를 결정하는 기법을 제안했다.

위와 같은 기법들은 대부분 고정형 안테나를 이용하거나, 자동차를 이용하여 대규모 네트워크가 접근이 어려운 지형에서는 사용하기 힘들다. 따라서 드론과 같은 UAV를 이용하여 에너지 전송함으로써 접근이 힘든 지역에서도 사용할 수 있는 기법이 필요하다.

III. 병합 노드 선택 및 관리

본 논문에서는 무선 전력 전송이 가능한 드론을 모바일 싱크로 사용하는 에너지 수집형 무선 센서 네트워크에서, 데이터를 임시로 모으는 병합 노드를 선정, 관리하고 에너지를 전달해줌으로써 병합 노드 주변의 핫 스팟 문제를 완화시키고 네트워크 연결성을 향상

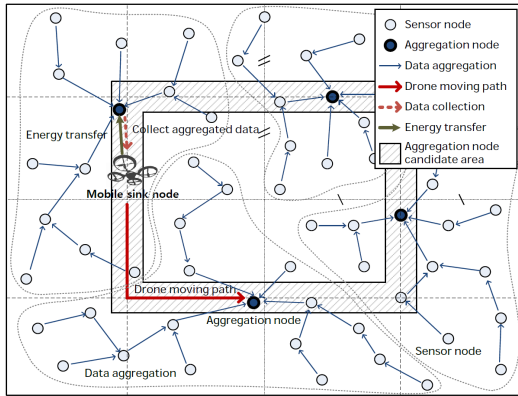


그림 1. 제안 기법의 개략도
Fig. 1. Overview of the proposed scheme

시키는 기법을 제안한다. 이 기법에서 센서 노드들은 병합 노드에게 주기적으로 센싱된 데이터를 전송하고, 드론이 고정된 경로를 돌며 병합 노드들을 방문하여 그 때까지 모인 데이터를 전달받는다. 이 때, 드론은 병합 노드에게 에너지를 전달해줌으로써 병합 노드가 정전이 되지 않게 한다. 드론이 네트워크를 순회할 때, 다음 번 병합 노드의 위치를 정하고, 이 위치의 노드들 중에서 병합 노드가 될 수 있을 만큼의 에너지를 가진 노드를 병합 노드로 선정하여 정전이 되는 것을 막고, 네트워크 연결성을 향상시킨다. 이 기법은 자동차나 사람이 접근하기 어려운 지역에서 전송 지연이 중요하지 않은 지연 내성 네트워크를 대상으로 고안되었다. 그림 1은 제안 기법의 동작을 간략히 보여준다.

3.1 병합 노드의 에너지 모델

제안 기법에서는 센서 노드의 에너지 상태를 고려하여 병합 노드를 선정하고 충전해줄 에너지양을 결정한다. 이를 위해, 싱크 노드가 전체 네트워크를 한 번 순회하는 시간을 한 라운드로 정하고, 그 동안의 소모 에너지양과 수집 에너지양을 계산한다.

센서 노드는 한 라운드 동안 센싱, 데이터 전송 등에 에너지를 소모하고, 환경 에너지를 수집하여 배터리를 채운다. 즉, 다음 라운드에 센서 노드의 남은 에너지양 \hat{e}_r 는

$$\hat{e}_r = e_r + e_h - e_{Tx} - e_{sys} \quad (1)$$

가 된다. 여기서 e_r , e_h , e_{Tx} 과 e_{sys} 는 각각 노드의 잔여 에너지양, 수집 에너지양, 데이터 송신 에너지양, 그리고 송신을 제외한 나머지 소모 에너지양을 나타

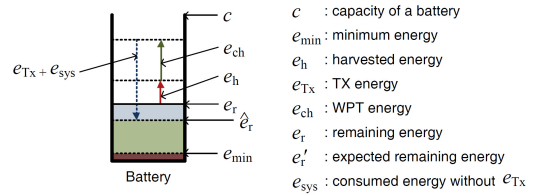


그림 2. 센서 노드의 에너지 모델
Fig. 2. Energy model of a sensor node

낸다. e_r 는 센서 노드에서 측정 가능하고, e_h 는 Pro-Energy^[17]를 통해 예측할 수 있다.

병합 노드는 센서 노드로부터 데이터를 전송 받아서 싱크 노드가 왔을 때, 싱크 노드에게 데이터를 전송한다. 이 때, 다른 노드로부터 받은 데이터를 전부 전송해야하기 때문에 다른 노드들보다 많은 데이터를 전송하게 되고, 그 결과 e_{Tx} 를 더 소모하게 된다. 하지만 병합 노드는 드론이 왔을 때만 데이터를 전송하고 그 전까지는 수신만하기 때문에 드론이 방문하기 전까지는 다른 노드들 보다 에너지를 적게 소모한다. 즉, 다음 라운드에 싱크 노드가 방문하기 전까지 병합 노드의 남은 에너지 \hat{e}_r^a 는 수식 (1)에서 데이터 전송 부분을 제외하고

$$\hat{e}_r^a = e_r + e_h - e_{sys} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 \hat{e}_r^a 가 노드가 동작하기 위한 최소 에너지 e_{min} 보다 크다면 병합 노드는 다음 드론이 올 때까지 살아남을 수 있다. 즉,

$$\hat{e}_r^a \geq e_{min} \quad (3)$$

를 만족시키면 병합 노드는 드론이 다음번에 도착할 때까지 데이터를 모으며 살아남을 수 있다. 또한, 본 기법에서는 드론이 병합 노드에 에너지를 전달해줄 수 있기 때문에 병합 노드는 데이터 전송 시 드론이 전달 해주는 에너지를 활용할 수 있다. 그러므로

$$\hat{e}_r^a - e_{Tx} + e_{ch} \geq e_{min} \quad (4)$$

를 만족시키면 병합 노드의 데이터를 성공적으로 드론에게 전달할 수 있다. 여기서 e_{Tx} 는 [18]의 에너지 소모 모델에 의해

$$e_{Tx} = s\beta r^\alpha \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 s 는 노드가 전송할 데이터양(bit)을 의미하고, β 는 거리에 따라 bit당 전송에 소모하는 에너지(J/bit/m^α), r 는 센서 노드의 전송 거리, α 는 경로 손실(2~5)을 의미한다. 만약 각 병합 노드가 균일하게 배치되어 같은 수의 노드로부터 데이터를 받는다면, 1개의 센서 노드가 1라운드 동안 수집하는 데이터양이 s_n 라고 할 때, 각 병합 노드가 한 라운드동안 전송해야 하는 데이터양 s_a 는

$$s_a = \frac{ns_n}{n_a} \quad (6)$$

가 된다. 이것을 식 (4)와 (5)에 대입하면

$$\hat{e}_r^a - \frac{ns_n}{n_a}\beta r^\alpha + e_{ch} \geq e_{min} \quad (7)$$

가 된다. 이 식을 만족시키면 이 노드가 병합 노드가 됐을 때 데이터 전송을 다른 노드에 비해 많이 함에도 불구하고 드론으로부터 에너지를 전달 받아서 에너지가 고갈되지 않고 정상 동작할 수 있다.

제안 기법에서는 병합 노드 선택 시, 위의 식 (7)을 고려하여 정전 노드가 되지 않을 정도의 에너지를 가진 노드 중에서 병합 노드를 선택한다. 그림 2는 위의 에너지 모델을 보여준다.

3.2 드론의 에너지 모델

모바일 싱크 노드로 사용되는 드론은 전체 에너지는 이동, 병합 노드에서 데이터 수집, 다음 병합 노드 선택, 노드에 공급하는 에너지로 구분할 수 있다. 드론은 전체 배터리 내에서 이 항목들에 에너지를 나눠 사용해야 하며, 그 양은 전체 노드 수, 병합 노드의 수, 이동 거리에 따라 결정 될 수 있다.

드론은 이전 라운드의 병합 노드에 방문하여 병합 노드가 모은 데이터를 수거하고 에너지를 병합 노드에게 전달한다. 이 때, 드론은 에너지 전달을 위해 일 정시간 정지해야하기 때문에 병합 노드 위치에 착륙해야 하고, 이착륙 에너지 e_{land} 가 소모된다. 또한, 데이터를 전송받아야하기 때문에 통신에 필요한 에너지 e_{comm}^s 가 소모된다. 따라서 병합 노드가 n_a 개 일 때, 드론이 병합 노드에서 소모하는 에너지는

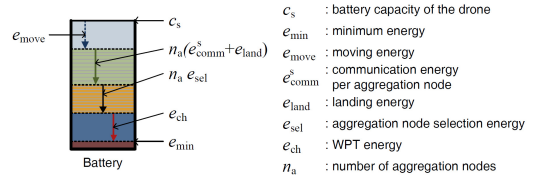


그림 3. 드론의 에너지 모델
Fig. 3. Energy model of the drone

$n_a(e_{land} + e_{comm}^s)$ 가 된다. 드론은 추가로 네트워크를 순회할 때 다음 라운드에 병합 노드가 될 노드를 선정하고 이를 그 노드들에게 알려줘야 한다. 새 병합 노드를 알려주는 과정에서 소모되는 에너지가 e_{sel} 일 때, 모든 새로운 병합 노드를 선정하는 과정에서 소모되는 에너지는 $n_a e_{sel}$ 가 된다. 이동에 소모되는 에너지는 드론이 정해진 경로를 따라 이동하기 때문에 고정된 값 e_{move} 를 갖는다. 이렇게 소모하고 남은 에너지는 병합 노드들에게 충전시켜줄 수 있다. 따라서 드론의 전체 에너지 용량 c_s 는

$$c_s = e_{move} + n_a(e_{land} + e_{comm}^s) + n_a e_{sel} + e_{ch}^{total} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 e_{ch}^{total} 는 병합 노드에게 충전시켜주는 에너지이다. 위의 식에서 e_{move} , n_a , e_{land} , e_{comm}^s , 그리고 e_{sel} 는 거의 변하지 않는 값이기 때문에 위의 식을 이용하여 e_{ch}^{total} 를 쉽게 구할 수 있다. 그림 3은 드론의 에너지 모델을 각 요소별로 보여준다.

3.3 드론의 동작

제안된 기법에서 드론은 크게 두 가지 동작을 한다. 첫 번째는 병합 노드들을 방문하여 데이터를 수집하는 일이다. 드론은 주기적으로 경로를 순회하며 병합 노드에서 지난 라운드 동안 쌓인 데이터를 수거한다.

이 때, 드론은 자신의 남은 에너지 e_{ch}^{total} 를 각 병합 노드에게 분배해줘서 병합 노드가 정전 상태에 빠지지 않게 한다. 드론은 각 병합 노드에게 균등하게 에너지를 분배해주고, 각 병합 노드가 전달받는 에너지양 e_{ch} 는

$$e_{ch} = \frac{\eta e_{ch}^{total}}{n_a} \quad (9)$$

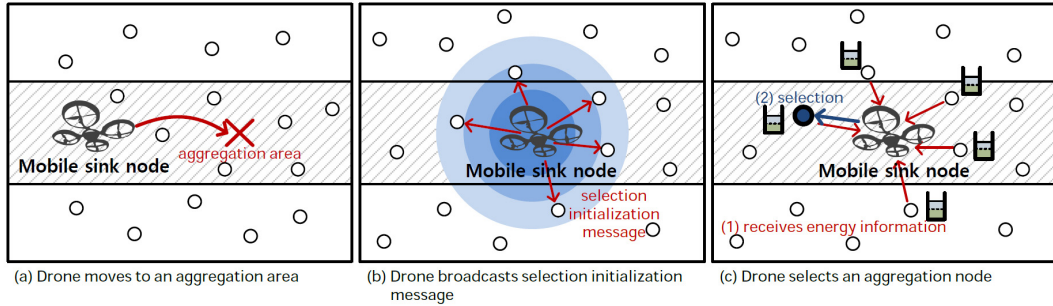


그림 4. 병합 노드 선택 과정
Fig. 4. Aggregation node selection process

가 된다. 여기서 η 는 에너지 전송 효율이다.

드론의 두 번째 일은 새로운 병합 노드를 선출하는 것이다. 드론은 네트워크를 순회하기 전에 미리 병합 노드 후보 위치를 정하고 그 후보 위치로 이동하여 병합 노드 선택 과정을 수행한다. 이 과정은 3.4절에서 자세히 설명한다.

3.4 병합 노드 선택

센서 노드의 전송 홉 수를 최소화하기 위해서는 병합 노드가 균일하게 배치되어 있어야 한다. 병합 노드는 정해진 경로 안에서 선택되기 때문에 경로 안에서 일정한 거리 간격으로 선택되면 센서 노드의 데이터 전송 경로 길이가 공평하게 줄어들 것이다. 따라서 본 기법에서는 드론의 이동 경로 내에서 일정 간격으로 병합 노드를 배치한다. 또한 라운드마다 시작 위치를 무작위로 선정함으로써 각 노드의 전송 경로 길이를 다변화함으로써 전체 노드의 에너지를 비교적 균등하게 소모하게 한다.

병합 노드를 선정하기 위해, 드론이 데이터를 수집하러 출발하기 이전에 이동 경로 중에 한 지점을 무작위로 선정한다. 그 지점을 병합 노드 후보 지역으로 선정하고 그 지점부터 일정 간격으로 n_a 개의 병합 노드 후보 지역을 선정한다. 드론은 이 병합 노드 후보 지역을 방문하면 센서 노드들에게 Selection Initialization 메시지를 뿌린다. 이 메시지에는 드론이 노드에 충전해 줄 수 있는 에너지양 e_{ch} 가 포함된다. 이 메시지를 받은 노드들은 식 (7)을 이용하여 자신이 병합 노드가 됐을 때, 다음 라운드까지 살아있을 수 있는지를 검사한다. 식 (7)을 만족시키는 노드들은 드론에 자신의 예상 남은 에너지 \hat{e}_r^a 를 드론에 전달한다. 드론은 이 메시지를 보내온 노드 중 가장 적은 \hat{e}_r^a 를 가진 노드를 병합 노드로 선택하고, 이를 그 노드에게

알린다. 에너지가 적은 노드를 선택하는 이유는 병합 노드가 데이터를 모아 드론에게 전송하기 때문에 가장 많은 에너지를 소모하지만, 병합 노드의 에너지 상태가 식 (7)을 만족한다면 부족한 부분은 드론의 에너지를 공급을 통해 보완하여 정전상태가 되지 않기 때문이다. 또한 병합 노드에 가까운 노드는 핫 스팟 현상으로 많은 에너지를 소모하기 때문에, 다른 노드들에 비해 많은 에너지를 가지고 있어야 정전이 발생하지 않아 데이터 손실을 줄일 수 있다. 그림 4는 전체 병합 노드 선정 과정을 보여준다.

3.5 라우팅과 데이터 수집

병합 노드 선정이 끝난 후, 병합 노드로 선정된 노드는 다른 센서 노드들에게 자신이 병합 노드가 되었음을 알리고 라우팅하기 위해 병합 노드 ID 및 병합 노드까지의 홉 수를 설정하여 라우팅 메시지를 범람 형태로 뿌리게 된다. 이를 받은 센서 노드는 이 메시지를 보낸 병합 노드를 자신이 데이터를 전송할 병합 노드로 설정하고, 메시지에 포함된 병합 노드 ID와 병합 노드까지의 홉 수, 자신에게 메시지를 뿌린 노드의 ID를 기록한 후 이 메시지의 정보를 갱신하여 다시 뿌린다. 이 때 필요 없이 너무 많은 노드에게 전달되는 것을 막기 위해 이 메시지의 최대 홉 수를 기록하여, 한 홉 지날 때 마다 1씩 감소시키고, 0이 되면 더 이상 메시지를 전달하지 않게 한다. 만약 한 노드가 자신의 병합 노드를 정했는데 다른 라우팅 메시지를 또 받게 되면 이전에 기록한 병합 노드까지의 홉 수와 새 병합 노드까지의 홉 수를 비교하여 적은 홉을 가진 병합 노드를 자신의 병합 노드로 재설정한다. 모든 센서 노드는 이렇게 선택된 병합 노드에 자신의 데이터를 전송하게 되고 전송 경로는 라우팅 메시지가 온 경로의 역 경로가 된다. 그림 5는 병합 노드 선정과 라우팅 과정의 의사 코드를 보여준다.

Algorithm 1: Aggregation node selection and routing

```

Result: Aggregation node
1 aggr ← null;
2 hop-to-aggr ← ∞;
3 if receive selection initialization message then
4   Calculate estimated remaining energy using  $e_{ch}$ ;
5   Send energy information in Equation (7);
6 end
7 if receive selection message then
8   Become an aggregation node;
9   aggr ← itself;
10  hop-to-aggr ← 0;
11  Broadcast routing message;
12 end
13 if receive routing message then
14   if hop in routing message < hop-to-aggr then
15     aggr ← aggregation-node in routing message;
16     hop-to-aggr ← hop in routing message;
17     Decrease hop in routing message;
18     sender in routing message ← itself;
19     Broadcast routing message;
20   end
21 end
    
```

그림 5. 병합 노드 선택과 라우팅 과정
Fig. 5. Aggregation node selection and routing

지금까지 드론이 데이터를 수집하기 위해 경로를 순회할 때 다음 병합 노드를 선택하고, 데이터를 수집하며 에너지를 전달하는 방법에 대해 설명했다. 에너지 수집형 센서 네트워크에 본 기법을 적용함으로써 데이터 전송에 많은 에너지를 소모하는 병합 노드가 정전상태에 빠지지 않고, 에너지 불균형 문제를 완화하여 네트워크의 연결성을 향상시킴으로써 데이터 수집률을 높일 수 있다.

IV. 성능평가

4.1 시뮬레이션 환경

우리의 기법의 성능 분석을 위해 SolarCastalia^[19]를 모바일 싱크에 맞게 수정하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 1) ^[25]의 기법을 에너지 수집형 노드에 맞게 수정한 기법 (fixed), 2) 병합의 위치를 랜덤으로 선택하는 기법 (random), 3) 병합의 위치를 랜덤으로 선택하나 무선 전력 전송을 하지 않는 기법 (random (no charge))의 총 3가지 기법과 비교하였다. fixed 기법은 고정된 길이의 병합 노드를 드론이 최단거리로 찾아가는 기법이다. random 기법과 random (no charge) 기법은 병합 노드의 위치를 드론의 경로에서 일정 간격으로 선출하고 주기적으로 이들을 교체하는 기법이

표 1. 주요 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation Parameters

Parameters	Values
Number of nodes	500
Node density	0.03
Simulation time	20 days
Topology	Random
Routing	Minimum depth tree
Transmission range	10 m
Battery capacity	110 mAh
Duration of a round	1 hour
Drone battery capacity	4,480 mAh
WPT efficiency	50%

다. 모든 기법들은 고정된 수의 병합 노드를 선정하고, fixed와 random 기법은 드론이 병합 노드에 도착했을 때, 병합 노드의 에너지를 완전히 충전시켜 준다. 각 경우에 대해 시뮬레이션은 약 20(2400라운드)일 동안 진행하였으며, 10번 반복한 실험의 평균값을 사용하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 주요 파라미터를 보여준다.

4.2 시뮬레이션 결과

4.2.1 병합 노드 수의 변화에 따른 성능 분석

그림 6, 7과 8은 각각 병합 노드 수의 변화에 따른 정전 노드의 수, 센싱 데이터 수, 그리고 드론이 수집한 데이터 수를 보여준다. 무선 전력 전송을 사용하지 않는 기법은 병합 노드의 수에 영향을 많이 받지 않지만, 제안된 기법, fixed와 random은 병합 노드의 수가 적을 때 정전 노드의 수가 많은 것을 알 수 있다. 또한 센서들이 센싱한 데이터 수는 병합 노드의 수에 따라 크게 변하지 않지만, 드론이 수집한 데이터 양은 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 병합 노드의 수가 적을 때는 많은 노드의 데이터가 적은 수의 병합 노드에 몰리기 때문에 병합 노드 주변의 노드들이 핫스팟 문제로 정전 상태가 되기 때문인 것을 알 수 있다. 그 결과, 노드들이 센싱을 많이 하더라도 그것을 전달할 경로가 끊겨서 병합 노드에 많이 도달하지 않는 것으로 판단된다. 제안 기법은 다른 기법에 비해 성공적으로 수집된 데이터가 많고, 병합 노드의 수에 따른 영향이 적은 것을 알 수 있다. 또한 사용할 에너지와 충전될 에너지를 고려하여 병합 노드를 뽑았기 때문에, 그렇지 않은 random 기법에 비해서도 더 성공적으로 데이터를 수집하는 것을 알 수 있다.

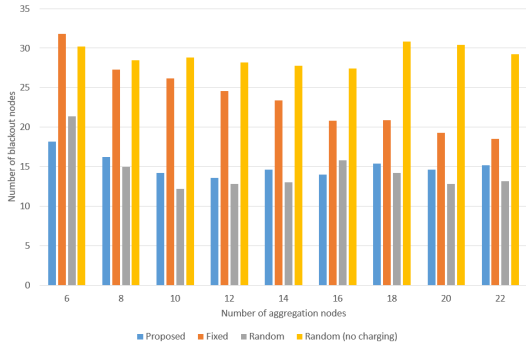


그림 6. 병합 노드 수의 변화에 따른 정전 노드 수
Fig. 6. The number of blackout nodes according to the number of aggregation nodes

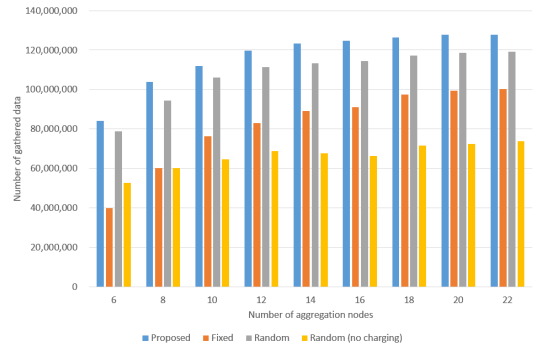


그림 9. 노드 수의 변화에 따른 정전 노드 수
Fig. 9. The number of blackout nodes according to the number of sensor nodes

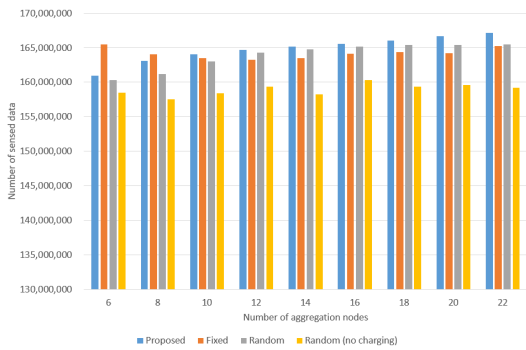


그림 7. 병합 노드 수의 변화에 따른 센싱 데이터 수
Fig. 7. The number of sensed data according to the number of aggregation nodes

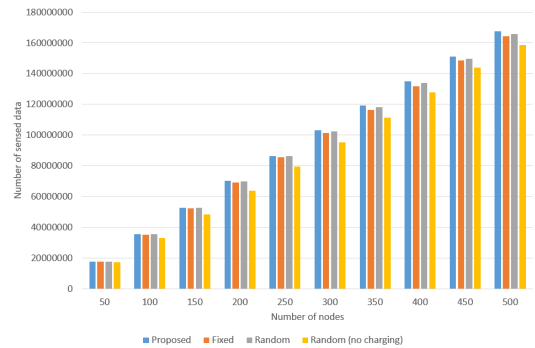


그림 10. 노드 수의 변화에 따른 센싱 데이터 수
Fig. 10. The number of sensed data according to the number of sensor nodes

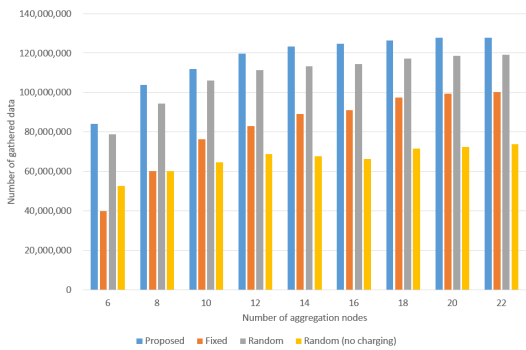


그림 8. 병합 노드 수의 변화에 따른 수집된 데이터 수
Fig. 8. The number of gathered data at the drone according to the number of aggregation nodes

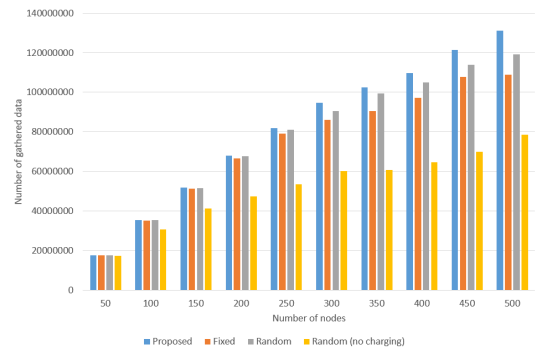


그림 11. 노드 수의 변화에 따른 수집된 데이터 수
Fig. 11. The number of gathered data at the drone according to the number of sensor nodes

4.2.2 노드 수의 변화에 따른 성능 분석

그림 9, 10과 11은 각각 전체 센서 노드 수의 변화에 따른 정전 노드의 수, 센싱 데이터 수, 그리고 드론이 수집한 데이터 수를 보여준다. 공통적으로 노드 수가 커질수록 정전 노드의 수가 증가하는 것을 볼 수

있다. 이것은 노드가 많을수록 더 많은 데이터를 중계해야하기 때문인 것으로 판단된다. 노드 수의 증가에 따라 모든 기법의 센싱된 데이터양도 증가하지만, 드론이 수집한 데이터양은 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 노드 수가 많아지면 핫 스팟 문제가 커지는데,

다른 기법에 비해 제안된 기법은 노드 수의 증가에 크게 영향 받지 않는 것을 볼 수 있다. 이것은 제안된 기법이 핫 스팟 문제를 효과적으로 해결하고 있기 때문이다. 한편, 노드 수가 증가함에 따라, 제안 기법과 random 기법의 정전 노드의 수에 비해 다른 기법들의 증가폭이 적은 것을 볼 수 있는데, 이것은 핫 스팟에 있는 노드들이 정전됨에 따라, 다른 노드들이 데이터를 전송할 수 없기 때문에 그 만큼 데이터를 덜 전송해서 그런 것으로 판단된다.

우리는 위와 같이 병합 노드 수와 전체 노드 수의 변화에 따른 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 기법이 다른 기법에 비해 병합 노드 수와 전체 노드 수의 변화에 더 잘 적응하고, 핫 스팟 문제의 영향을 덜 받음으로써, 네트워크의 연결성과 데이터 수집량이 증가된 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 에너지 수집형 센서 노드로 구성된 무선 센서 네트워크에서, 무선 전력 전송이 가능한 드론을 모바일 싱크로 활용하여, 데이터를 수집하는 동시에 남은 에너지를 전달함으로써, 네트워크의 연결성과 데이터 수집량을 높이는 기법을 제안했다. 제안 기법에서, 병합 노드를 일정 간격으로 선정함으로써 데이터 전송 홉 수를 줄여 센서 노드들의 데이터 전송 홉 수를 감소시켰고, 그 결과 데이터 중계 에너지가 감소하여 노드의 수명을 연장시켰다. 또한 여러 노드 중에서 데이터를 전송할 수 있는 에너지가 존재하는 노드를 병합 노드로 선택하고, 드론이 이들을 직접 충전해줌으로써 병합 노드의 정전을 방지하고 네트워크의 지속력을 향상시켰다. 결과적으로 본 기법은 다른 기법에 비해 네트워크의 연결성이 향상되고, 손실되는 데이터가 적어서 데이터 수집량이 증가했다.

References

[1] P. Wang, H. Hou, X. He, C. Wang, T. Xu, and Y. Li, "Survey on application of wireless sensor network in smart grid," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 52, pp. 1212-1217, 2015.

[2] D. Kim, S. Kim, M. Ha, T. Kim, and Y. Lee, "Internet of things technology and development direction," *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 28, no. 9, pp. 49-57, Aug. 2011.

[3] J. A. Khan, H. K. Qureshi, and A. Iqbal, "Energy management in wireless sensor networks: A survey," *Computers & Electrical Eng.*, vol. 41, pp. 159-176, Jan. 2015.

[4] M. Lee, S. Gang, Y. Kim, S. Jeon, and T. Jeong, "Overview of wireless power transfer technology," in *Proc. KIEE*, vol. 59, no. 1, pp. 34-43, Jan. 2010.

[5] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou, and A. Lou, "Wireless power transfer and applications to sensor networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 20, no. 4, pp. 140-145, Aug. 2013.

[6] W. Tu, X. Xu, T. Ye, and Z. Cheng, "A study on wireless charging for prolonging the lifetime of wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 17, no. 7, pp. 1560, Jul. 2017.

[7] N. Najeeb and C. Detweiler, "Extending wireless rechargeable sensor network life without full knowledge," *Sensors*, vol. 17, no. 7, pp. 1642, Jul. 2017.

[8] F. Sangare, Y. Xiao, D. Niyato, and Z. Han, "Mobile charging in wireless-powered sensor networks: Optimal scheduling and experimental implementation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 8, pp. 7400-7410, Aug. 2017.

[9] S. Chen, Y. Shu, B. Yu, C. Liang, Z. Shi, and J. Chen, "Mobile wireless charging and sensing by drones," in *Proc. 14th Annu. Int. Conf. Mob. Syst., Appl., and Services Companion*, pp. 99-99, Singapore, Singapore, Jun. 2016.

[10] M. B. Ghorbel, D. Rodríguez-Duarte, H. Ghazzai, M. J. Hossain, and H. Menouar, "Joint position and travel path optimization for energy efficient wireless data gathering using unmanned aerial vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 3, pp. 2165-2175, Mar. 2019.

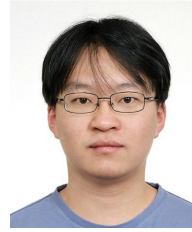
[11] J. Valente, D. Sanz, A. Barrientos, J. D. Cerro, Á. Ribeiro, and C. Rossi, "An air-ground wireless sensor network for crop monitoring," *Sensors*, vol. 11, no. 6, pp. 6088-6108, Jun. 2011.

[12] K. Li, W. Ni, L. Duan, M. Abolhasan, and J.

Niu, "Wireless power transfer and data collection in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 3, pp. 2686-2697, Mar. 2018.

- [13] S. Guo, C. Wang, and Y. Yang, "Joint mobile data gathering and energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks," *IEEE Trans. Mob. Computing*, vol. 13, no. 12, pp. 2836-2852, Dec. 2014.
- [14] S. B. Jadhav and S. M. Lambor, "Hybrid solar and radio frequency (RF) energy harvesting," in *Proc. IEEE ICPCSI*, pp. 1975-1980, Chennai, India, Sep. 2017.
- [15] C. Wang, J. Li, Y. Yang, and F. Ye, "A hybrid framework combining solar energy harvesting and wireless charging for wireless sensor networks," in *Proc. 35th Annu. IEEE Int. Conf. Comput. Commun.*, pp. 1-9, San Francisco, CA, USA, Apr. 2016.
- [16] K. N. Park and I. Yoon, "An efficient energy charging scheme for wireless sensor networking using a mobile sink capable of wireless power transmission," *J. Korea Soc. Comput. and Inf.*, vol. 24, no. 5, pp. 1-9, May 2019.
- [17] A. Cammarano, C. Petrioli, and D. Spenza, "Pro-Energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks," in *Proc. IEEE 9th Int. Conf. MASS 2012*, pp. 75-83, LasVegas, NV, USA, Oct. 2012.
- [18] T. Melodia, D. Pompili, and I. F. Akyildiz, "Optimal local topology knowledge for energy efficient geographical routing in sensor networks," in *Proc. IEEE INFOCOM 2004*, pp. 1705-1716, Hong Kong, China, Mar. 2004.
- [19] J. M. Yi, M. J. Kang, and D. K. Noh. "SolarCastalia: Solar energy harvesting wireless sensor network simulator," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 11, no. 6, <https://doi.org/10.1155/2015/415174>, Jun. 2015.

윤익준 (Ikjune Yoon)



2006년 2월 : 전북대학교 전자
정보공학부 졸업

2015년 8월 : 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 석·박사 졸업

2015년 8월~현재 : 숭실대학교
스마트시스템소프트웨어학과
연구조교수

<관심분야> 무선센서네트워크, 임베디드시스템, IoT
[ORCID:0000-0002-5699-162X]