

An Efficient Cluster Management Scheme Using Wireless Power Transfer for Mobile Sink Based Solar-Powered Wireless Sensor Networks

Youngjae Son*, Minjae Kang**, Dong Kun Noh*

*Student, Dept. of Software Convergence, Soongsil University, Seoul, Korea

**Adjunct Lecturer, School of Convergence Specialization, Soongsil University, Seoul, Korea

*Professor, Dept. of Software Convergence, Soongsil University, Seoul, Korea

[Abstract]

In this paper, we propose a scheme that minimizes the energy imbalance problem of solar-powered wireless sensor network (SP-WSN) using both a mobile sink capable of wireless power transfer and an efficient clustering scheme (including cluster head election). The proposed scheme charges the cluster head using wireless power transfer from a mobile sink and mitigates the energy hotspot of the nodes nearby the head. SP-WSNs can continuously harvest energy, alleviating the energy constraints of battery-based WSN. However, if a fixed sink is used, the energy imbalance problem, which is energy consumption rate of nodes located near the sink is relatively increased, cannot be solved. Thus, recent research approaches the energy imbalance problem by using a mobile sink in SP-WSN. Meanwhile, with the development of wireless power transmission technology, a mobile sink may play a role of energy charging through wireless power transmission as well as data gathering in a WSN. Simulation results demonstrate that increase the amount of collected data by the sink using the proposed scheme.

▶ **Key words:** Wireless Sensor Network, Mobile Sink, Wireless Power Transfer, Cluster, Harmony Search Algorithm

[요 약]

태양 에너지 수집형 무선 센서 네트워크(SP-WSN)는 지속적으로 에너지를 수집할 수 있어 배터리 기반 센서 네트워크의 에너지 제약 문제를 완화할 수 있다. 하지만 고정된 싱크를 사용하면, 싱크 주변에 위치한 노드들의 에너지 소비가 상대적으로 증가하는 문제, 즉 에너지 사용 불균형 문제는 해결하지 못한다. 따라서 최근의 연구에서는 SP-WSN에 모바일 싱크를 사용하여 에너지 불균형 문제에 접근하고 있다. 한편, 무선 전력 전송 기술 발전에 따라 WSN에서 모바일 싱크가 데이터 수집뿐 아니라 무선 전력 전송을 통한 에너지 충전의 역할도 할 수 있다. 본 논문에서는 무선 전력 전송이 가능한 모바일 싱크와 효율적인 클러스터링 기법(클러스터 헤드 선출 포함)을 이용하여 SP-WSN의 에너지 불균형 문제를 최소화하는 기법을 제안한다. 제안 기법은 클러스터 헤드를 무선 전력 전송을 사용하여 충전시키고, 효과적인 헤드 선출을 통해 헤드 주변 노드의 에너지 핫스팟을 완화시켜, 결과적으로 모바일 싱크로 수집되는 데이터양을 증가시킨다.

▶ **주제어 :** 무선 센서 네트워크, 모바일 싱크, 무선 전력 전송, 클러스터링 기법, 하모니 서치 알고리즘

- First Author: Youngjae Son, Corresponding Author: Dong Kun Noh
- *Youngjae Son (karit@ssu.ac.kr), Dept. of Software Convergence, Soongsil University
- **Minjae Kang (minjaekang@ssu.ac.kr), School of Convergence Specialization, Soongsil University
- *Dong Kun Noh (dnoh@ssu.ac.kr), Dept. of Software Convergence, Soongsil University
- Received: 2019. 12. 26, Revised: 2020. 01. 13, Accepted: 2020. 01. 21.

I. Introduction

무선 센서 네트워크(WSN)는 사람이 접근하기 힘든 지역이나 광범위한 지역의 환경을 모니터링하기 위해 수 많은 저전력, 저가 센서 노드를 배치한 네트워크를 일컫는다[1]. 이러한 WSN은 각 노드가 가진 배터리의 제약적인 에너지양으로 인해 동작 시간에 한계가 있다는 문제를 가지고 있고, 이를 해결하기 위해 에너지 소모를 최소화하는 많은 연구가 수행되었다. 또한, WSN은 일반적으로 고정된 위치의 싱크 노드를 사용하는데, 저가 센서 노드를 사용함에 따라 통신 범위가 넓지 않아서 다른 노드를 거쳐서 싱크 노드로 전달하는 멀티 홉 전달 방식을 사용하게 된다. 이 경우, 싱크 주변에 존재하는 노드들이 중계해야 하는 데이터가 상대적으로 많아져서 상대적으로 에너지를 많이 소모하게 되는 에너지 핫스팟 문제(에너지 사용 불균형 문제)가 발생한다[2].

WSN의 이런 문제들을 해결하기 위해 많은 연구가 수행되었다. 우선, 배터리 기반 센서의 근본적인 에너지 제한 문제를 해결하기 위해 1) 환경 에너지를 이용한 에너지 수집형 센서 노드에 대한 연구가 진행되었다[3]. 여러 환경 에너지 중에서도 특히 태양 에너지는 주기적이고 높은 수집량을 보여 다른 에너지원에 비해 센서 노드에 더 적합하다고 할 수 있다. 이러한 태양 에너지 수집형 센서 노드들로 이루어진 센서 네트워크를 태양 에너지 기반 무선 센서 네트워크(SP-WSN)라고 한다. 또한, 2) 드론과 같은 모바일 시스템이 무선 전력 전송(WPT)을 통해 센서 노드들에 에너지를 충전해주는 기법들도 제안되었다[4]. 이 경우, 모바일 시스템의 에너지가 제한적이기 때문에 방문하여 충전해 줄 수 있는 노드의 개수가 한정될 수밖에 없는데, 이를 위해 충전을 해 줄 최적의 노드 선정 및 이 노드들의 방문 경로 설정 등에 대한 연구가 많이 진행되었다[5].

아울러, 고정된 위치의 싱크 주변 노드들의 에너지 불균형 문제를 해결하기 위한 기법들도 연구가 되고 있는데, 그중에서도 3) 모바일 싱크를 활용한 연구가 활발하다[6]. 이 경우, 모바일 싱크의 에너지가 유한한 관계로 모든 센서 노드를 방문하여 데이터를 수집할 수 없는 문제가 발생하기 때문에 대부분은 클러스터링 기법이나 특정 영역만 이동하면서 데이터를 수집하는 방법을 함께 제안하고 있다[7]. 클러스터 헤드 등 일부 노드만 방문하여 데이터를 수집하면 되기 때문이다. 이렇게 모바일 싱크와 클러스터링 기법을 함께 사용하는 경우, 클러스터의 분할이 중요하다. 또한, 최적의 클러스터링을 하였을지라도 클러스터 헤드와 그 주변 노드의 에너지 불균형 문제는 (고정된 위치의 싱크 및 그 주변

노드만큼은 아니지만) 여전히 존재하므로 이를 줄이기 위한 효율적인 클러스터 헤드 선정 기법이 필요하다.

본 논문에서는 전술한 1), 2), 3)의 연구를 기반으로, 무선 전력 전송이 가능한 모바일 싱크와 효율적인 클러스터링 기법(클러스터 헤드 선출 포함)을 이용하여 SP-WSN의 에너지 불균형 문제를 최소화하는 기법을 제안한다. 제안 기법은 SP-WSN을 대상으로 설계되었기 때문에 (배터리 기반 WSN과 달리) WSN의 영구적인 사용이 가능하다. 또한, 클러스터 헤드를 무선 전력 전송을 사용하여 충전시키고, 아울러 효과적인 헤드선출을 통해 헤드 주변 노드의 에너지 핫스팟을 완화시켜, 결과적으로 정전 노드 수를 감소시키고 수집된 데이터양을 증가시킨다.

II. Preliminaries

1. Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

배터리 기반 무선 센서 네트워크와 관련된 대부분의 연구에서는 에너지 사용량을 최소화하여 생명주기를 늘리는 것이 목표였다. 하지만 여전히 에너지양이 제한되어 있다는 근본적인 문제로 인해 그 수명이 영속적일 수는 없다. 따라서 배터리를 일정 주기마다 충전하거나 교체해 주어야 한다.

근본적으로 노드의 수명 문제를 해결하기 위하여, 최근 에너지 수집형 무선 센서 노드가 등장하였는데, 이는 주변 환경 에너지원으로부터 에너지를 수집하여 전기 에너지로 전환해 배터리를 충전하는 센서 노드으로써 하드웨어의 고장이 없다면 영속적인 동작이 가능하다. 주변 에너지 수집 방법에는 태양광을 이용하거나 풍력, 진동, 압력 등을 활용한다. 이 중에서 태양 에너지는 높은 밀도와 예측 가능성으로 인해 WSN분야에서 가장 많이 연구되고 있다.

2. Wireless Power Transfer

무선 전력 전송 기술은 이동 통신 장치, 전기차, WSN 등 여러 응용프로그램에서 사용된다. 특히, WSN에서는 주로 자동차나 드론에 충전 장치를 장착하여 이동하면서 센서 노드를 충전시켜준다. 자동차의 경우, 에너지가 상대적으로 무한한 대신에 자동차가 지나갈 수 있는 도로가 있어야 한다는 문제가 발생한다. 그에 반해 드론은 공중으로 이동함으로써 도로가 없어도 센서 노드에 도달 할 수 있다. 그러나 드론은 배터리의 제약이 존재하여 이동할 수 있는 거리가 제한된다. 따라서 모바일 싱크를 효율적인 이동 경로로 이동시키며, 적당량의 에너지를 센서 노드에 충전해주는 연구가 진행되고 있다[8].

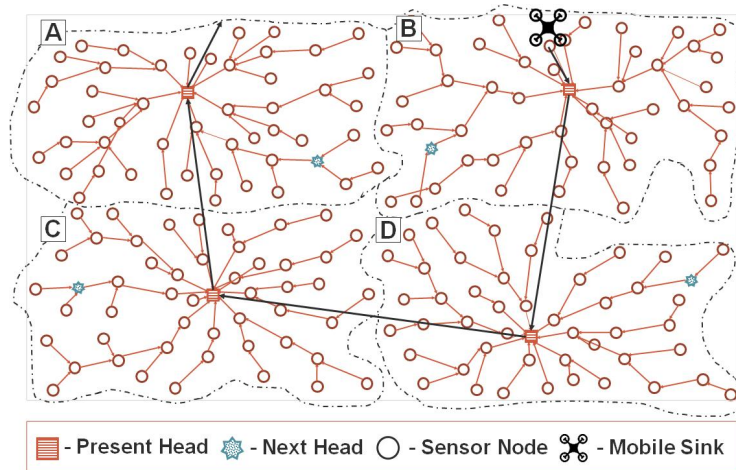


Fig. 1. Overview of the proposed scheme

3. Optimal Cluster Structure for Mobile Sink

모바일 싱크가 모든 노드를 방문하기 어려우므로 특정 노드만을 방문해야 하는데, 이를 위해 네트워크를 클러스터링 하는 것이 필요하게 된다. 클러스터마다 클러스터 헤드 노드가 존재하여 클러스터 내부의 데이터를 수집한다면, 모바일 싱크는 이러한 클러스터 헤드 노드들만 방문하면 된다. 네트워크의 클러스터 최적화 문제는 결정시간 다항시간 알고리즘이 존재하지 않아, 이를 해결하는 방법으로 메타 휴리스틱 알고리즘이 많이 사용된다. 이는 자연을 모방하여 점차 최적의 해를 찾는 방식이다. 예를 들어 생물체가 환경에 적응하면서 진화해가는 모습을 모방한 유전 알고리즘(GA)[9], 새나 물고기와 같이 집단행동을 하는 생물의 집단행동 특성을 모방한 입자 군집 최적화(PSO)[10], 음악을 작곡할 때 아름다운 소리를 내는 하모니를 찾는 과정을 모방한 하모니 서치 알고리즘(HSA)[11] 등이 존재한다.

III. The Proposed Scheme

본 논문에서는 무선 전력 전송이 가능한 모바일 싱크와 효율적인 클러스터링 기법을 함께 사용하여 에너지 불균형 문제를 최소화하는 기법을 제안한다. Fig. 1은 제안 기법의 개략적인 동작을 보여준다.

1. Energy Neutral Operation of Node

클러스터 헤드 또는 핫스팟 지역이 아닌 위치에 존재하는 센서 노드는 사용하는 에너지($E_{consume}$)를 태양 에너지로부터 충전되는 양($E_{harvest}$)보다 항상 덜 소비하도록 듀티 사이클, 센싱 속도 등을 컨트롤한다. 따라서 시간이 지날수록

노드의 잔여 에너지($E_{residual}$)는 일반적으로 단조 증가하게 된다. 이를 노드의 에너지 중립적인 동작(energy-neutral operation, ENO)이라 한다. 노드가 ENO를 만족시켜야 정전 시간 없이 안정적으로 동작할 수 있다.

일반 센서 노드가 아닌 클러스터 헤드는 헤드의 역할을 수행함으로써 추가적인 에너지(E_{header}^{extra})를 사용하여 아무리 다른 사용량을 줄여도 ENO를 충족시켜주지 못한다. 따라서 클러스터 헤드의 ENO를 보장하기 위해서는 모바일 싱크가 데이터 수집을 위해 헤드를 방문하면서 에너지를 충전해 주어야 한다.

주의할 것은 모바일 싱크는 클러스터 헤드 노드들만을 충전해준다는 점이다. 클러스터 헤드 주변의 에너지 핫스팟 지역에 있는 노드들은 현재 주기 동안 데이터 중계로 인하여 수집 에너지보다 사용 에너지가 (헤드만큼은 아니지만) 일반 노드에 비해 상대적으로 큼에도 불구하고 에너지 충전을 받지 못한다. 따라서 이들 노드는 이후 라운드에서 수집 에너지양이 소비 에너지양보다 충분히 많아야 한다. 이를 위해서는 다음 클러스터 헤드의 위치가 중요하다. 예를 들어 다음 클러스터 헤드의 위치가 현재 헤드와 가깝다면, 이전 에너지 핫스팟 지역이 이번에도 에너지 핫스팟 지역이 될 가능성이 크고, 이는 핫스팟 지역 노드들의 정전을 유발하게 된다. 제안 기법에서는 다음 클러스터 헤드 선출에 이러한 사항을 고려하여, 장기적으로 ENO가 보장될 수 있도록 하였다.

2. Initial Clustering Structure

본 논문에서는 메타 휴리스틱 중에서 구현이 간단하고 WSN에 적용하기 쉬운 하모니 서치 알고리즘(HSA)을 사용하였다[12]. 초기에 무선 센서 노드를 무작위로 배치된

WSN에서 베이스 스테이션은 센서 노드의 위치 정보를 바탕으로 HSA를 이용한다. HSA는 최적의 클러스터 수와 각 클러스터의 헤드 및 구성 멤버를 구할 수 있다. 이러한 클러스터링을 찾기 위하여 클러스터 멤버 간의 응집도와 클러스터 간의 간격을 고려해 적절한 클러스터 구성인지 파악할 수 있는 목적함수를 정하는데, 이 목적함수의 값은 응집도가 최소이고 클러스터 간의 간격이 최대일 때, 최솟값을 갖는다. 따라서 최적의 클러스터를 찾는 과정은 목적함수의 최솟값을 찾는 것이다.

HSA는 다음과 같은 방식으로 동작한다. 초기에 일정 범위 내에서 랜덤으로 솔루션(클러스터 헤드 목록)을 여러 개 결정한다. 그중 위에서 설명한 목적함수로 평가했을 때 가장 좋은 솔루션을 계속 조정하면서 최적의 값을 찾는다. 조정하는 방식에는 기억 회상, 피치 조정이 존재한다. 기억 회상은 가장 좋은 솔루션에 있는 값을 그대로 가져오거나 랜덤으로 새로운 값을 찾는 방식이며, 피치 조정은 해당 클러스터 헤드에서 가장 가까운 위치에 존재하는 센서 노드로 헤드를 변경하거나 그대로 두는 방식이다. 이러한 연산 과정을 반복하여 가장 작은 최적의 솔루션을 찾아나간다.

그 결과로 해당 네트워크를 위한 최적의 클러스터 수, 클러스터 헤드, 그리고 클러스터 구성 멤버 노드를 결정할 수 있다. 또한 하모니 서치 알고리즘을 통해 선정된 헤드의 위치 정보를 가지고 모바일 싱크는 각 클러스터 헤드를 방문할 최단 거리 이동 경로와 자신이 나누어 줄 수 있는 에너지량을 계산한다. 이러한 정보들을 가지고 클러스터 헤드를 방문하면서 헤드임을 알리고 해당 클러스터 구성 멤버가 누구인지 알려준다. 동시에, 클러스터 수만큼 균등하게 나눈 여분 에너지를 헤드에 충전시켜준다. 그리고 나서 클러스터 헤드는 모바일 싱크로부터 받은 정보를 가지고 플래딩을 이용하여 클러스터링하게 된다. 클러스터링할 때 먼저 도착한 패킷의 송신자를 해당 노드의 부모로 선정하면서 트리를 구성해 나간다. 최종적으로 트리 구성이 완료되면 노드들이 데이터 수집을 시작할 수 있다.

3. Next Round Cluster Head Election Algorithm

라운드 가 끝나기 직전(모바일 싱크가 클러스터 헤드 도착하기 전에) 각 노드는 자신의 여분 에너지와 이웃 노드 번호를 현재 클러스터 헤드에 전송한다. 클러스터 헤드는 각 노드의 잔여 에너지가 수식 (1)을 만족하는 노드를 다음 주기 헤드 후보로 선정한다.

$$\overline{E_{header}^{extra}} + \overline{E_{consume}} < E_{residual} \quad (1)$$

이 후보 노드 중에서 Table 1의 가중치를 고려하여 수식 (2)의 결과 값 R 을 구한다. 여기서 가장 큰 값을 가진 노드는 다음 클러스터 헤드가 된다.

$$R_i = \alpha \left(1 - \frac{EV_i}{EV_{max}}\right) + \beta \frac{NN_i}{NN_{max}} + \gamma \frac{HC_i}{HC_{max}} \quad (2)$$

수식 (2)에서, i 는 해당 클러스터의 후보 헤드를 의미하고, EV_{max} 는 해당 클러스터 내에서 후보 헤드와 그 이웃 노드의 에너지 분산 값 중에서 가장 큰 값을 의미한다. NN_{max} 와 HC_{max} 는 각각 해당 클러스터 내에서 이웃 노드 수가 가장 많은 것과 현재 헤드와의 거리가 가장 먼 값을 의미한다. 각각 α , β , γ 의 가중치를 주는 각 항목의 설명은 Table 1에 나타내었다. 1번 항목 값이 작은 후보 헤드들은 주변 노드들과 에너지 불균형 문제가 심하지 않다는 의미이므로 현재 헤드와의 거리가 멀리 떨어져 있을 가능성이 높다. 그러면 현재 핫스팟 지역에 존재하는 노드는 에너지를 회복할 수 있는 기회가 제공된다. 그러나 1번만 고려하면 트리 말단에 위치하거나 주변 이웃 노드 수가 적은 후보 노드가 헤드로 선정될 가능성이 있어 다음 헤드가 되었을 때 헤드 주변 노드가 심한 핫스팟이 될 수 있다. 이를 방지하기 위해 2번 항목을 추가로 고려한다. 3번 항목은 현재 헤드와 후보 헤드 사이의 거리를 의미한다. 홉 수가 클수록 이전 헤드와의 거리가 멀어지므로 핫스팟이었던 노드들이 다음 라운드에 많은 에너지를 회복할 수 있게 된다. α , β , γ 의 값은 실험적으로 정해야 하는데, 보통 α 의 가중치가 가장 중요하다.

Table 1. Next head election considerations

Number	Weight	Content
1	α	Energy variance between candidate head and neighbor nodes (EV)
2	β	The number of neighbor nodes within 1-hop distance (NN)
3	γ	Hop count between candidate head and current head (HC)

헤드 선출이 완료되면 현재 클러스터 헤드가 헤드로 선출된 노드에게 다음 라운드의 헤드임을 알려주고, 본인이 기본 동작으로 소비되는 에너지 이외에 헤드의 역할을 수행함에 따라 추가로 사용한 에너지($\overline{E_{header}^{extra}}$) 값을 전달한다. $\overline{E_{header}^{extra}}$ 는 클러스터마다 이동 평균값으로 구하고 모바일 싱크의 여분 에너지를 각 클러스터 헤드에 얼마씩 나누어줄지 지표로 사용된다.

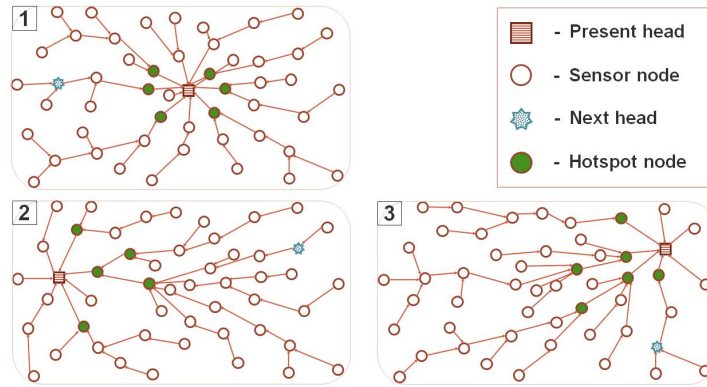


Fig. 2. Change of a tree structure within a cluster

모바일 싱크가 현재 클러스터 헤드를 방문하여 데이터를 수집하고, 에너지를 전송한 후에, 다음 라운드가 시작된다. 다음 라운드가 시작되면, 새롭게 선출된 클러스터 헤드가 플러딩을 이용하여 트리를 재구성한다. 초기 단계와 비슷한 방식으로 트리를 구성하는데 다른 점은 이전과 같은 부모 노드에게 플러딩 패킷을 받으면 그 뒤로는 트리 구조가 변하지 않기 때문에 더 진행되지 않도록 플러딩을 멈춰서 에너지 낭비를 최소화한다.

Fig. 2은 라운드에 따라 트리가 변화하는 과정을 보여준다. 여기서 주의 깊게 볼 것은 핫스팟 지역의 변화이다. Fig. 2-1번에서 클러스터 헤드 주변의 핫스팟이었던 노드(초록색으로 색칠된 노드)가 클러스터 헤드의 변화에 따라 Fig. 2-2번에서는 일반 센서 노드로 사용되는 모습을 볼 수 있다. 이와 마찬가지로 Fig. 2-2번 클러스터 내의 트리 구조에서 한 라운드가 지나면(모바일 싱크가 다녀간 후) 트리가 재구성되어 Fig. 2-3번처럼 바뀌게 된다. 이때, 헤드 주변의 핫스팟 지역이 이전 라운드와 비교하여 멀리 이동한 것을 알 수 있다.

4. Data Gathering and Recharge

모바일 싱크가 출발하기 전에, 베이스 스테이션은 모바일 싱크의 최단 이동 경로와 각 클러스터 헤드에게 충전해 줄 수 있는 에너지양을 계산한다. 최단 경로는 지난 라운드에 모바일 싱크가 수집한 헤드의 위치 정보를 가지고 TSP 알고리즘[13]을 이용하여 계산한 값이다. 그리고 모바일 싱크가 클러스터 헤드에게 충전해 줄 수 있는 에너지 양은 수식 (3)에 따라 결정한다.

$$E_i^{\text{charge}} = \eta_i \times (E_{\text{capacity}}^{\text{drone}} - (E_{\text{moving}}^{\text{drone}} + E_{\text{dataRecv}}^{\text{drone}} + E_{\text{system}}^{\text{drone}}))$$

$$\eta_i = \frac{E_{\text{header}}^{\text{extra}}}{\sum_{k=1}^n E_{\text{header}_k}^{\text{extra}}} \quad (3)$$

수식 (3)에서, i 는 해당 클러스터를 의미하고 n 은 클러스

터 개수를 의미한다. 모바일 싱크인 드론과 관련된 항목으로는 드론의 배터리 총 용량 $E_{\text{capacity}}^{\text{drone}}$, 드론이 이동하는데 사용되는 에너지양 $E_{\text{moving}}^{\text{drone}}$, 드론이 데이터 수집하는데 필요한 에너지양 $E_{\text{dataRecv}}^{\text{drone}}$, 드론의 시스템에 필요한 에너지 $E_{\text{system}}^{\text{drone}}$ 가 있다. η 는 각 클러스터 헤드가 추가로 사용한 에너지가 다른 클러스터 헤드에 비해 어느 정도 되는지 나타내는 비율이다. 즉 모바일 싱크의 잔여 에너지를 각각 클러스터에서 소비한 에너지의 비율에 맞게 나누어준다.

한 라운드가 끝나면 모바일 싱크는 클러스터 헤드를 방문하면서 2가지 동작을 한다. 모바일 싱크는 1) 헤드로부터 한 라운드 동안 클러스터 내에서 수집된 데이터, 다음 라운드의 헤드 노드 정보, 그리고 $E_{\text{header}}^{\text{extra}}$ 값을 수신한다. 또한 2) 수식 (3)에 따라 구한 에너지를 각 클러스터 헤드에게 충전해주어 ENO를 유지할 수 있게 한다.

IV. Experiments

본 연구에서 제안한 기법의 성능 분석을 위해 Solar Castalia[14]를 모바일 싱크와 무선 전력 전송이 가능한 연구에 맞게 수정하여 시뮬레이션 하였다. 사용된 파라미터는 에너지 수집이 가능한 모티브인 eZ430-RF2500[15], 드론은 DJI Mavic Air 모델을 기반으로 설정하였다.

1. Experiment Environment

실험 환경은 확장성을 보여주기 위해서 센서 필드 영역을 100m×100m로 고정하고 노드 수 400, 1000, 1600개를 랜덤하게 배치하여 50일 동안 진행하였다. 본 논문에서 제안하는 기법의 성능 분석을 위해 헤드를 랜덤하게 선출하는 기법과 시뮬레이션 결과를 비교 분석 하였다. 두 기법 모두 같은 클러스터링을 사용하였고, 모바일 싱크가 라

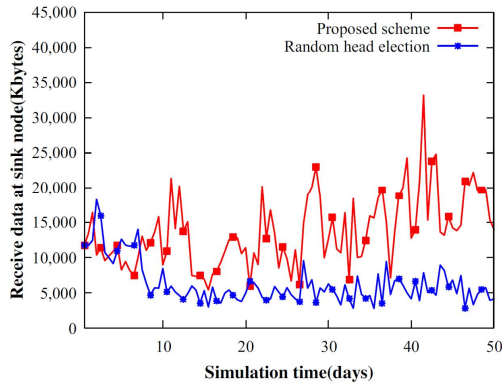


Fig. 3. Received data at sink node over time

운드마다 클러스터 헤드에 에너지를 충전하게 하였다. 또한, 헤드 선출 방식에 필요한 가중치 α , β , γ 값은 여러 실험을 통하여 가장 적합한 비율을 사용하였다. 자세한 실험 환경은 Table 2와 같다.

Table 2. Simulation parameter

Parameter	Value
Simulation time	50 days
Field size	100m×100m
Number of nodes	400, 1000, 1600
Sensor node battery capacity	110 mAh
Sensor nodes sensing data	100 bytes/min
Sensor nodes transmission range	10 m
RX energy	6.5 mW
TX energy	5.9 mW
Mobile sink battery capacity	2375 mAh
$\alpha : \beta : \gamma$	8 : 1 : 1

2. Experiment Result Analysis

Fig. 3는 센서 노드 1000개에서 시간에 따른 모바일 싱크가 수집한 데이터양이고 Fig. 4는 노드 수를 다르게 하여 모바일 싱크가 수집한 평균 데이터양을 나타낸 그래프이다.

Fig. 3를 보면 제안 기법에서 모바일 싱크가 수집하는 데이터양이 더 많다. 이는 제안 기법에서 정전되는 노드는 비교 기법과 달리 현재 클러스터에 치명적이지 않은 위치(헤드 주변의 핫스팟 지역이 아닌 위치)에서 발생하여 헤드로 수집되는 데이터가 상대적으로 많기 때문이다. 한편, 에너지가 충분한 초반에는 비교 기법이 제안 기법보다 모바일 싱크로 수집되는 데이터양이 더 많을 수도 있다. 이는 다음 주기에 선정된 클러스터 헤드가 이전 클러스터 헤드 주변에 위치할 경우, 센서 노드가 데이터를 전달하는 방향이 비슷하여 한 라운드에 클러스터 헤드로 수집되는 데이터양이 상대적으로 많기 때문이다.

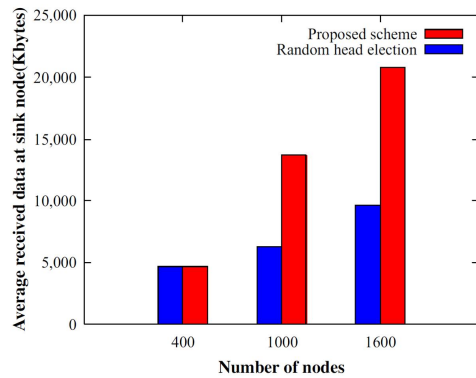


Fig. 4. Average received data at sink node

Fig. 4에서 노드 수가 400개 일 때는 비슷한 데이터 수집 양을 보인다. 왜냐하면 각 클러스터에 속한 센서 노드의 수가 많지 않아서 클러스터 헤드로 수집되는 데이터가 적기 때문이다. 따라서 센서 노드가 소비하는 에너지양이 적어 거의 정전되지 않는다. 이처럼 센서 노드 밀도가 작을 때는 정전노드가 발생하지 않아 두 기법이 비슷하게 동작하는 것이다. 반면에, 노드 밀도를 증가 시켜 센서 노드 수가 1000, 1600개 되었을 때는 수집되는 평균 데이터양의 차이가 급격히 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 클러스터에 속한 노드의 수가 증가하여, 클러스터 헤드로 모이는 데이터가 많아졌기 때문이다. 특히, 비교 기법에서는 클러스터 헤드 주변에 위치한 노드들이 정전됨에 따라 센서 노드가 클러스터 헤드로 향하는 경로를 잃어 수집량에서 큰 차이를 보였다. 또한, 밀도가 증가할수록 수집되는 데이터양의 증가 폭이 감소하는 이유는 클러스터 내에서 다루어질 수 있는 센서 노드 수에 한계가 있기 때문이다.

V. Conclusions

본 논문에서는 태양 에너지를 사용하여 WSN을 영속적으로 동작시키는 SP-WSN을 대상으로, 모바일 싱크의 무선 에너지 충전기법과 효율적인 클러스터링 및 클러스터 헤드 선출기법을 통해 가능한 모든 노드가 에너지 중립적인 동작(ENO)을 충족 시켜 정전 노드로 인한 데이터 손실을 최소화할 수 있도록 하였다. 우선, 베이스 스테이션에서 하모니 서치 알고리즘을 활용하여 최적의 클러스터링을 한다. 그 후에, 무선 전력 전송이 가능한 모바일 싱크를 이용하여 데이터를 수집하는 동시에 자신의 에너지를 클러스터 헤드로 충전시켜줌으로 헤드 노드의 에너지 부족 현상을 방지하였다. 또한 에너지가 충분한 노드 중에 현재 클러스터 헤드 위치에서 가능한 멀리 떨어지고 이웃 노드

들도 충분한 노드를 다음 클러스터 헤드로 정함으로써 기존 헤드 주변 핫스팟 노드들이 충분히 에너지를 회복할 수 있는 시간을 확보할 수 있었고, 이를 통해 핫스팟 문제를 경감시킬 수 있었다. 결과적으로 본 기법은 다른 기법에 비해 더 많은 양의 데이터를 수집할 수 있고, 노드의 밀도가 높아질수록 더 높은 효율을 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Soongsil University Research Fund(Convergence Research) of 2019.

REFERENCES

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [2] J. Li and P. Mohapatra, "An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks," *Proc. VTC-2005-Fall. IEEE 62nd Vehicular Technology Conference*, pp. 2721-2725, 2005 (in USA)
- [3] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.13, No. 3, pp.443-461, Jul. 2011.
- [4] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou and A. Lou, "Wireless power transfer and applications to sensor networks," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 20, No. 4, pp. 140-145, Aug. 2013.
- [5] H. Salarian, K. Chin and F. Naghdy, "An Energy-Efficient Mobile-Sink Path Selection Strategy for Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, No. 5, pp. 2407-2419, Jun. 2014.
- [6] J. Luo and J.-P. Hubaux, "Joint Mobility and Routing for Lifetime Elongation in Wireless Sensor Networks," *Proc. IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, pp. 1735-1746, 2005. (in USA)
- [7] C. Tunca, S. Isik, M. Y. Donmez and C. Ersoy, "Distributed Mobile Sink Routing for Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 16, No. 2, pp. 877-897, Oct. 2013.
- [8] M. Ma and Y. Yang, "Data gathering in wireless sensor networks with mobile collectors," *Proc. IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing*, pp. 1-9, 2008. (in USA)
- [9] J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, USA, 1992.
- [10] J. Kennedy, R.C. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, 1995. (in Australia)
- [11] Z.W. Geem, J.H. Kim, and G.V. Loganathan, "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search," *SIMULATION*, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68, Feb. 2001.
- [12] Osama Moh'd Alia, "Dynamic relocation of mobile base station in wireless sensor networks using a cluster-based harmony search algorithm," *Information Sciences*, Vol. 385-386, pp.76-95, Apr. 2017.
- [13] M. Bellmore and G. L. Nemhauser, "The Traveling Salesman Problem: A Survey," *Operations Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 538-558, Jun. 1968.
- [14] J. Yi, M. Kang and D. Noh, "SolarCastalia : Solar Energy Harvesting Wireless Sensor Network Simulator," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 11, No. 6, pp 1-10, Jun. 2015.
- [15] Texas I., "EZ430-RF2500 Development Tool User's Guide," Texas Instruments SLAU227E, Texas Instruments Incorporate: Austin, TX, USA, 2007.

Authors



Youngjae Son received the B.S. degrees 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.



Minjae Kang received the Ph.D. degrees in Department of Electronic Engineering from Soongsil University, Korea, in 2019. He is currently an adjunct lecturer in School of Convergence Specialization at Soongsil University.

His research interests include cyber physical system, mobile networks, and ubiquitous sensor network.



Dong Kun Noh received the Ph.D. degree in Computer Science and Engineering from Seoul National University in 2007. He is currently associated professor in Department of Software Convergence at Soongsil University.

His primary research interests include embedded system, mobile computing, and ubiquitous sensor networks.