

Cluster-Based Mobile Sink Location Management Scheme for Solar-Powered Wireless Sensor Networks

Eomji Oh*, Minjae Kang**, Ikjune Yoon***, Dong Kun Noh****

Abstract

In this paper, we propose a sink-location management and data-routing scheme to effectively support the mobile sink in solar-powered WSN. Battery-based wireless sensor networks (WSNs) have a limited lifetime due to their limited energy, but solar energy-based WSNs can be supplied with energy periodically and can operate forever. On the other hand, introduction of mobile sink in WSNs can solve some energy unbalance problem between sink-neighboring nodes and outer nodes which is one of the major challenges in WSNs. However, there is a problem that additional energy should be consumed to notify each sensor node of the location of the randomly moving mobile sink. In the proposed scheme, one of the nodes that harvests enough energy in each cluster are selected as the cluster head, and the location information of the mobile sink is shared only among the cluster heads, thereby reducing the location management overhead. In addition, the overhead for setting the routing path can be removed by transferring data in the opposite direction to the path where the sink-position information is transferred among the heads. Lastly, the access node is introduced to transmit data to the sink more reliably when the sink moves frequently.

▶Keyword: Wireless Sensor Networks, Energy Harvesting, Solar Energy, Mobile Sink, Clustering

I. Introduction

무선 센서 네트워크(WSN)는 센서로 구성되어 있는 네트워크로서 무선센서를 사용하여 주변 지역의 정보를 수집하는 역할을 수행한다. 정보를 수집하는 센서노드들과 수집된 데이터가 모이는 싱크 노드로 구성되어 있으며 지역 정보 수집, 군사 지역, 자연 재해 알람, 헬스케어, 스마트홈 등 여러 분야에서 활용되고 있다.

WSN의 노드들은 자원의 제약, 특히 에너지의 제한으로 인하여, 에너지의 사용을 최소화하는 방향으로 동작하는데, 예를 들어 싱크 노드로의 데이터 전송을 위하여 여러 센서 노드를 거쳐서 데이터를 전송시키는 멀티홉 방식을 사용한다[1]. 그러나 배터리 기반 센서 노드는 근본적인 에너지의 유한성으로 인

하여 배터리가 방전되면 교체를 해주거나 폐기시킬 수밖에 없다. 이를 극복하기 위해 에너지 수집형 센서에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다[2]. 특히 태양에너지는 에너지 밀도 및 주기성으로 인하여 WSN에 최적의 에너지원으로 생각되고 있다. 그러나, 수집되는 에너지양의 정확한 예측이 어렵고, 재충전 가능한 배터리의 용량이 제한적이기 때문에 수집 에너지 양에 적응적인 에너지 사용 스케줄링이 필요하다.

한편, 모바일 싱크를 이용한 무선 센서 네트워크는, 기존의 고정된 위치의 싱크를 사용하는 WSN에서 발생하는 싱크 주변 노드들과 외곽 노드들 간의 에너지 불균형 문제를 어느 정도 해결할

• First Author: Eomji Oh, Corresponding Author: Dong Kun Noh

*Eomji Oh (ejoh@ssu.ac.kr), Dept. of Software Convergence, Soongsil University

**Minjae Kang (mjkang@ssu.ac.kr), Dept. of Electronic Engineering, Soongsil University

***Ikjoon Yoon (ikjune.yoon@gmail.com), Dept. of Smart Systems Software, Soongsil University

****Dong Kun Noh (dnoh@ssu.ac.kr), Dept. of Software Convergence, Soongsil University

• Received: 2017. 07. 18, Revised: 2017. 07. 27, Accepted: 2017. 09. 08.

• This research was supported by the MSIP(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program (IITP-2017-2012-0-00646) supervised by the IITP(Institute for Information & communications Technology Promotion)

수 있게 하였으나, 무작위로 움직이는 싱크의 위치를 각 노드에 알려야 하는 문제가 발생한다. 특히, 모바일 싱크의 위치를 알리기 위한 가장 쉬운 방법인 플러딩 기법은 단순하지만, 모든 노드에게 싱크의 위치를 알리는데 오버헤드가 매우 커질 수 있다. 싱크의 이동성이 커질수록 그 오버헤드는 점점 커지게 된다.

따라서 본 논문에서는 태양 에너지 기반 WSN의 장점과 모바일 싱크의 장점을 결합하여, 수집된 태양 에너지를 모바일 싱크 관리 및 데이터 전송에 효율적으로 사용함으로써, 노드의 정전 시간을 최소화하고, 결과적으로 WSN에서 수집되는 데이터의 양을 최대화하는 기법을 제안한다. 제안 기법은, 각 클러스터에서 충분한 에너지를 수집한 노드들을 대상으로 클러스터 헤드를 선출하고, 이 클러스터 헤드들 간에만 모바일 싱크의 위치정보를 공유하여 위치 관리 오버헤드를 감소시킨다. 또한, 헤드 간에 위치정보가 전달된 경로의 반대 방향으로 데이터를 전달하여 라우팅 경로 설정을 위한 오버헤드도 제거하였다. 아울러, 액세스 노드의 개념을 도입하여 싱크가 자주 움직이는 경우에도 안정적으로 싱크까지 데이터를 전송할 수 있게 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 태양 에너지 수집형 무선 센서 네트워크와 모바일 싱크 관련 연구들을 소개하고, 3장에서는 제안 기법인 클러스터 기반의 모바일 싱크 위치 관리 기법 및 라우팅 기법을 설명한다. 4장에서는 실험을 통한 제안 기법의 성능 결과를 분석하고 5장에서 결론으로 마무리한다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Solar-Energy Harvesting WSNs

기존 WSN에서 사용되는 배터리 기반 센서 노드들은 유한한 에너지로 인한 제한된 수명을 갖고 있다. 따라서 네트워크의 수명을 늘리기 위하여, 시스템 측면이나 네트워크 측면에서 에너지 사용을 최소화하는 기법들이 많이 연구되었다. 그럼에도 불구하고 유한한 에너지라는 배터리의 근본적인 문제로 인하여, 배터리를 수동으로 교환하는 추가적인 작업을 하지 않는 한 WSN은 일회성 사용에 그치게 된다. 이 문제를 극복하기 위해 주변 환경으로부터 에너지를 수집하는 에너지 수집형 센서 노드들을 이용한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

에너지 수집형 센서 노드는 주변 환경에서 에너지를 수집하기 때문에 하드웨어의 문제가 없는 한 지속적으로 동작할 수 있다. 특히 태양에너지는 다른 수집 에너지원에 비해 전력 밀도가 높기 때문에, 대부분의 WSN 응용에서 센서 노드가 필요로 하는 에너지 요구량을 충분히 만족시킬 수 있다. 따라서 에너지 사용량의 최소화를 목표로 했던 배터리 기반의 무선 센서 네트워크의 여러 연구들과 다르게, 에너지 수집형 무선 센서 네트워크에서는 수집되는 에너지를 보다 효율적으로 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, 에너지 수집형 센서에서 에

너지 사용의 최소화를 목표로 한다면, 재충전 가능 배터리가 완충되어, 사용도 못 하고 버려지는 수집에너지가 발생할 수도 있다. 이와 관련하여, [3]의 연구에선 에너지 수집량과 소모량에 따른 에너지 문턱값 모델을 제안하여 문턱값 이상의 잔존에너지를 가진 노드에서는 에너지 사용을 최소화하는 대신 에너지를 활발히 사용하게 하는 기법을 제안하였고, [4]의 연구에선 태양에너지 수집량 예측 및 이에 따른 효율적인 에너지 스케줄링 기법을 제안하였다.

1.2 Cluster-based Approaches for mobile sinks

최근 들어, 드론 등의 모바일 싱크를 이용한 무선 센서 네트워크가 활발히 연구됨에 따라, 이를 효율적으로 지원하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다. 특히 클러스터링을 이용한 기법들이 낮은 오버헤드와 높은 효율성으로 인하여 가장 활발히 연구되고 있다.

- HCDD[5] : 모바일 싱크를 이용한 배터리 기반 무선 센서 네트워크에서 싱크의 위치를 알리는 오버헤드를 줄이기 위해 노드의 클러스터 레벨을 멀티 레벨로 나누어 최상위 레벨에게만 싱크의 위치를 알리는 기법이다. 그러나 이러한 배터리 기반의 WSN에서는 수집되는 에너지가 없고, 또한 각 레벨의 클러스터 헤드로 선출된 노드들은 에너지를 상대적으로 많이 사용하기 때문에, 각 노드는 라운드로빈 방식으로 헤드노드의 역할을 수행하게 된다.

- NGSPDD[6] : HCDD를 기반으로 하는 클러스터링 기법이다. 클러스터 헤드끼리 클러스터 ID와 다른 클러스터 간 홉카운트를 교환하여 싱크까지의 최단 거리 경로를 찾아낸다. 센서 노드부터 싱크까지 전달되는 데이터의 홉수는 감소하지만, 헤드 간 라우팅 테이블을 교환하는 오버헤드가 발생한다.

- EEMSRA[7] : LEACH[8]를 기반으로 하는 클러스터링 기법이다. 클러스터 헤드들과 멤버 노드들 간의 데이터 통신은 TDMA(time division multiple access)를 기반으로 한다. 싱크는 랜덤하게 움직이며 클러스터 헤드의 위치 정보를 수집하고 클러스터끼리의 평균 거리를 계산한다. 싱크가 수집한 클러스터 헤드의 에너지와 거리에 기반하여 새로 이동할 위치를 결정하게 된다.

- MSRP[9] : 이 기법은 클러스터 헤드와 싱크 간에 TDMA 스케줄링으로 데이터 전송을 조정하는 기법이다. 싱크는 네트워크를 이동하면서 현재 자신의 위치와 인접한 클러스터 헤드로부터 데이터를 얻는다. 그리고 헤드 노드들의 잔여 에너지에 대한 정보를 수집하여 더 높은 에너지를 가진 클러스터로 이동하면서 전체 네트워크의 에너지 균형을 맞춘다. 하지만 이 기법은 싱크가 클러스터 헤드 근처에 왔을 때 데이터 전송이 가능하기 때문에 지연을 허용하는(delay-tolerant) 응용에 사용이 국한된다. 또한, 제한된 시간동안 싱크가 모든 클러스터 헤드 노드를 방문할 것이라 보장 없이 때문에 네트워크의 일부가 제대로 서비스되지 않을 수 있다는 단점이 있다.

- CE-DSS : [10]의 연구에서는 고정된 경로를 이동하는 모

바일 싱크를 이용한 태양에너지 기반 WSN에서 데이터를 효율적으로 수집하는 클러스터링 기법을 제안하였다. 각 노드의 에너지 문턱값을 기준으로 잔여 에너지가 문턱값 이상인 노드들 중에서 클러스터 헤드를 선출하고 클러스터 헤드끼리는 서로 데이터 공유를 하여 싱크의 이동 거리를 줄이는 것을 목표로 하였다. 이 연구에서는 싱크가 고정된 경로를 이동하므로 싱크의 위치정보를 미리 알고 있다고 가정하였는데, 본 연구에서는 싱크가 무작위 경로로 이동하므로 싱크의 위치정보를 계속하여 갱신시켜야 할 필요가 있다.

1.3 Area-based Approaches for mobile sinks

특정 경계 영역의 노드를 상위 계층 노드로 지정하고 상위 계층 노드에 싱크의 위치를 저장하는 방식이다. 계층 구조 구축의 비용을 최소화할 수 있고, 네트워크 구조를 변경하는 대신 영역의 크기를 지정하여 상위 계층 노드의 추가적인 에너지 소모를 감소시킨다.

- Ring Routing[11] : 네트워크의 중앙에서부터 일정 거리에 있는 노드를 링 노드로 설정한 후, 링 노드에 주기적으로 모바일 싱크의 위치를 저장하는 기법이다. 센서 노드는 링에게 싱크의 위치를 요청하여 싱크의 위치 정보를 받을 수 있다. 링 노드의 에너지 상태가 일정 값 이하가 되면, 새로운 노드를 선택하여 링을 확장해 간다. 이 기법은 프로토콜 구성에 대한 오버헤드가 적고, 데이터 전송 라우팅 기법에 대한 제약이 없다. 또한, 핫스팟 문제를 완화시킬 수 있다는 장점이 있다. 하지만 네트워크 규모가 커질수록 링 구성 오버헤드와 싱크의 위치를 알리는 오버헤드가 증가하므로 확장성에 대한 문제가 있다.

III. The Proposed Scheme

본 장에서는 클러스터링 기반 모바일 싱크 위치 관리 기법 및 라우팅 기법을 제안한다. 제안 기법에서는 노드들을 k-평균 알고리즘[12]을 이용하여 초기에 한 번 클러스터링 한 후, 주기적으로 잔여 에너지양에 기반하여 클러스터 헤드와 액세스 노드를 선출한다. 싱크의 위치는 클러스터 헤드 간에만 공유되고, 싱크의 위치가 전달된 경로의 역으로 데이터를 전송하며, 안정적인 데이터 전송을 위해 액세스 노드를 사용한다.

1. Selection of the Operation Mode

제안 기법에서 각 노드는 자신의 현재 에너지양에 따라 두 가지 동작모드 중 한 가지를 선택하게 된다. 동작 모드는 ER모드(Energy-Rich mode)와 ES모드(Energy-Saving mode)로 구분되고 모드에 따라 노드의 동작이 달라진다. ER모드는 현재 노드의 에너지양이 기본 동작(센싱, 저장, 전달)을 수행할 때 필요한 에너지 외에 여분의 에너지가 존재하므로 추가적인 일을 수행할 수 있음을 나타낸다. ES모드로 동작한다는 것은 노드의

에너지가 불충분하므로 노드의 기본 동작들만을 수행하여 에너지를 아껴야 한다는 의미이다.

제안 기법에서는 에너지 문턱값(threshold)을 노드 동작모드 변경의 기준으로 사용한다. 에너지 문턱값은 각 노드별로 상이하며 노드의 에너지 수집량과 사용량에 따라 계속하여 변한다. 에너지 문턱값은 아래의 수식들을 통해 구할 수 있다.[3]

$$T_{full}(E_{residual}(i)) = \frac{C(i) - E_{residual}(i)}{P_{solar}(i) - P_{sys}(i)} \quad (1)$$

수식 (1)에서 $T_{full}(E_{residual}(i))$ 은 노드 n_i 의 배터리가 충전완료 될 때까지 걸리는 시간을 의미한다. $C(i)$ 는 노드 n_i 의 전체 배터리 용량, $E_{residual}(i)$ 은 노드 n_i 의 잔여 에너지양을 의미한다. 즉, $C(i) - E_{residual}(i)$ 는 전체 배터리 용량에서 잔여 에너지양을 뺀 값으로 추가적으로 충전할 수 있는 에너지양을 나타낸다. $P_{solar}(i)$ 는 노드 n_i 의 평균 에너지 수집률, $P_{sys}(i)$ 는 평균 에너지 소모율을 나타낸다. $P_{solar}(i) - P_{sys}(i)$ 는 노드의 에너지 수집률에서 소모율을 뺀 값으로 충전 되는 에너지속도를 나타낸다. 추가적으로 충전할 수 있는 에너지양을 충전되는 에너지속도로 나눈으로써 배터리가 완전히 충전될 때까지의 시간을 구할 수 있다.

$$E_{residual}(i) \geq T_{full}(E_{residual}(i)) \times P_{sys}(i) \quad (2)$$

수식 (2)는 배터리가 완전히 충전될 때까지의 시간동안 소모되는 에너지이다. 현재 노드 n_i 의 잔여 에너지양이 수식 (2)를 만족한다면 노드 n_i 에 여분의 에너지가 존재한다는 의미이다. 따라서 수식 (2)를 만족시키는 $E_{residual}(i)$ 값의 최소값을 에너지 문턱값 $E_{threshold}(i)$ 으로 설정하여 여분의 에너지 존재 여부를 결정하는 기준값으로 정한다. (1)과 (2)를 사용하면 $E_{threshold}(i)$ 는 수식(3)과 같다.

$$E_{threshold}(i) = \frac{P_{sys}(i)}{P_{solar}(i)} \cdot C(i) \quad (3)$$

$$E_{residual}(i) \geq E_{threshold}(i) \quad (4)$$

$P_{solar}(i)$ 가 커지게 될수록 수집되는 에너지가 많다는 의미로, 에너지 문턱값은 작아져서 수식 (4)를 만족할 확률이 높아지게 된다. 노드의 에너지 상태가 수식 (4)를 만족한다면 노드의 동작모드는 ER모드가 선택되고 여분의 에너지로 기본 동작 외에 추가 동작을 수행한다.

$$E_{residual}(i) < E_{threshold}(i) \quad (5)$$

반대로, $P_{sys}(i)$ 가 커질수록 소모되는 에너지가 많다는 의미

로 에너지 문턱값이 높아져서 수식 (5)를 만족할 확률이 높아지게 된다. 수식 (5)를 만족한다면 노드의 동작모드는 ES모드가 선택되고 기본 동작만을 수행하여 소모 에너지를 줄인다.

주의할 것은, 에너지 소모율이 수집률보다 크다면 문턱값이 배터리 총량보다 커지게 되어 항상 ES모드로 동작하게 된다는 점이다. 따라서, 노드의 동작 시간 조정(Duty-Cycle Control)이나 센싱 주기 조절(Sensing-Rate Control) 등을 통하여, 노드의 기본동작을 수행할 때의 $P_{sys}(i)$ 가 항상 $P_{solar}(i)$ 보다 작도록 초기 세팅을 하여야 한다.

2. Clustering

n개의 노드를 k개의 그룹으로 클러스터링하는 효율적인 방법인 k-평균 알고리즘을 통하여 WSN을 클러스터링 한다. 전체 노드에서 k개의 노드를 랜덤하게 선출한 후 선출된 각 노드들과 가까운 노드들끼리 그룹으로 나눈다. 그룹 안에서 평균 지점을 구하고 다시 각 평균 지점들과 가까운 노드들끼리 그룹으로 묶는다. 그룹의 변화가 없을 때까지 이 과정을 반복하여 클러스터링 한다. k-평균 기법을 사용한 이유는, 클러스터링 알고리즘이 WSN 배치 후 초기에 한 번만 수행되므로 시간 복잡도가 다소 크더라도, 클러스터링의 정확도를 높이기 위해서이다. 이 후, 각 클러스터의 노드들 중 하나를 클러스터 헤드로써 선출하게 되는데, 클러스터 헤드는 모바일 싱크의 위치정보를 공유하고, 또한 클러스터 내에 있는 멤버노드들의 데이터를 수집하여 이를 이웃 클러스터 헤드로 전송하는 역할도 해야 하기 때문에, 다른 노드들보다 현저히 많은 에너지를 소모하게 된다. 따라서 현재 에너지양이 에너지 문턱값보다 높은, 즉 ER모드에 있는 노드들 중에서 클러스터 헤드를 선출하게 된다. 이후, 클러스터 헤드의 잔여 에너지가 에너지 문턱값보다 적어 ES모드가 되면, 멤버 노드들 중 ER모드로 동작 중인 노드들 중 하나를 헤드로 재선출하여 에너지 균형을 맞춘다. 그림 1은 클러스터 헤드의 잔여 에너지가 에너지 문턱값보다 작아져서 다른 멤버 노드가 헤드로 선출되는 과정을 보여준다. 초기에는 H1 노드가 헤드노드였으나, 시간이 지나 H1 노드가 ES모드가 되어 H2 노드가 클러스터 헤드로 선출된다.

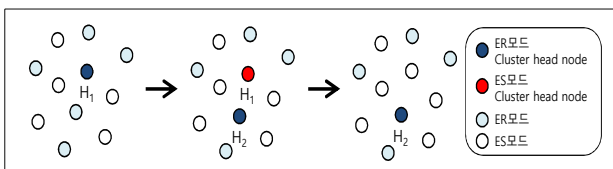


Fig. 1. Process for the cluster head selection

3. Advertisement of the Mobile Sink Location

싱크는 이웃 노드들 중 ER모드이면서 가장 가까운 노드에게 자신의 위치 정보를 등록하는데 이 노드를 액세스 노드라고 한다. 그림 2와 같이 액세스 노드로 선정된 노드는 싱크의 위치가 아닌 자신의 위치정보를 담은 패킷을 자신이 속한 클러스터 헤드에게 전송한다. 액세스 노드의 위치 정보를 받은 클러스터 헤

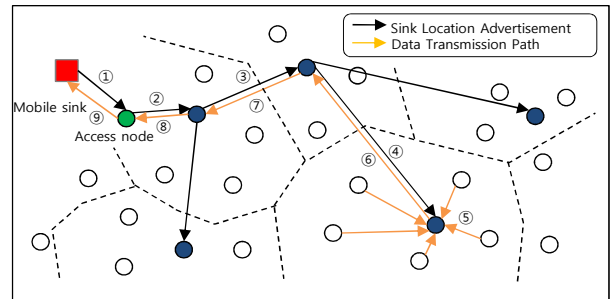


Fig. 2. Sink location advertisement and data relay path

드는 다른 헤드들에게 액세스 노드의 위치 정보를 공유함으로써 모든 클러스터 헤드는 싱크와 가장 가까운 액세스 노드의 위치를 알게 된다.

싱크의 위치가 아닌 액세스 노드의 위치를 알려주는 이유는 싱크가 이동했을 경우에도 기존의 액세스 노드를 활용하여 이동된 싱크노드로 데이터를 재전송하여, 이동하는 동안 발생할 수 있는 데이터의 손실을 최소화하기 위해서이다. 이는 3.6절에서 자세히 설명하고 있다.

4. Change of the Mobile Sink Location

앞서 설명했듯이, 모바일 싱크는 자신의 이웃 노드 중 가장 가까운 노드를 액세스 노드로 지정한다. 싱크와 액세스 노드는 서로의 연결성을 보장하기 위해 주기적으로 신호를 주고 받는다. 그림 3의 (a)와 (b)는 싱크의 위치가 변한 후에도 기존 액세스 노드의 전송 범위 내에 있는 상황을 나타낸다. 싱크가 움직인 후에도 기존의 액세스 노드와 계속 통신이 가능하기 때문에 액세스 노드는 이전과 변함이 없고, 따라서 라우팅 경로를 재설정하지 않는다.

싱크가 액세스 노드로부터 멀어져서 통신 범위에서 벗어나게 되면, 기존의 액세스 노드는 싱크와 신호를 주고 받을 수 없게 된다. 그러면, 싱크는 새로운 노드를 액세스 노드로 선정한다. 그림 3의 (b)와 (c)는 싱크 노드가 기존 액세스 노드의 통신 반경에서 벗어나 자신과 더 가까운 노드를 새로운 액세스 노드로 선정하는 것을 보여주고 있다. 이 때, 변경된 액세스 노드가 이전 액세스 노드와 같은 클러스터 멤버라면 클러스터 헤드끼리는 변경된 액세스 노드의 위치를 공유하지 않는다. 그림 2에서의 싱크 위치 알리는 과정 2번까지 수행하게 되고, 클러스터 헤드 간 라우팅 경로는 변함이 없다. 반면에, 다른 클러스터의 멤버 노드가 액세스 노드로 선택되었을 때 새로운 액세스 노드는 3.3에서 소개한 방식

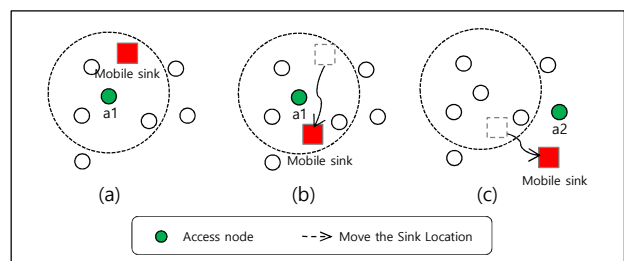


Fig. 3. Process for the change of access node

으로 다른 클러스터 헤드들에게 자신의 위치를 알리게 되고, 헤드 간 라우팅 경로가 재설정된다. 제안 기법에서는 고정된 액세스 노드를 설정함으로써 싱크가 위치를 변경시킬 때마다 변경된 위치를 알려야하는 오버헤드를 감소시킬 수 있다.

5. Data Transmission

클러스터가 구축되고 액세스 노드의 위치가 모든 클러스터 헤드에게 공유될 때 클러스터 헤드는 액세스 노드의 위치와 액세스 노드의 위치정보를 보내준 노드의 정보를 함께 저장하여, 데이터의 전송 경로로 사용한다.

각각의 멤버 노드들은 싱크의 위치와 상관없이 수집한 데이터를 자기가 속한 클러스터의 헤드에게 전송한다. 클러스터 내의 멤버 노드에서 클러스터 헤드까지는 멀티홉 전송으로 이루어진다. 클러스터 헤드는 수집한 데이터에서 중복 데이터를 제거하고, 자신에게 액세스 노드 정보를 보내준 이웃 클러스터 헤드에게 병합한 데이터를 전송한다. 그림 2와 같이 데이터는 액세스 노드의 위치가 공유된 경로의 역으로 전송된다.

액세스 노드 위치 공유를 헤드간 라우팅 경로 구축에 이용함으로써 따로 라우팅 경로를 구축하는데 드는 에너지 소모를 감소시킬 수 있다.

6. Preventing Data Loss due to the Mobility of Sink Node

데이터가 싱크로 전송되는 중에 싱크의 위치가 변경될 경우, 전송되던 데이터는 중간에 변경된 싱크의 위치 정보를 받지 못하는 이상, 싱크의 이전 위치로 전송되어 데이터의 손실이 발생한다. 따라서 제안 기법에서는 싱크로의 안정적인 데이터 전송을 위하여 싱크와 가장 가까운 거리의 고정된 액세스 노드를 설정하고 데이터가 액세스 노드로 수집되게 한다.

데이터가 전송되던 중 액세스 노드가 변경되었을 때, 데이터가 기존 액세스 노드에 도착하기 전에 변경된 액세스 노드의 위치 정보를 알게 된다면, 새롭게 형성된 라우팅 경로를 따라가게 된다. 그림 4는 h1 노드가 기존 라우팅 경로대로 데이터를 전송하던 중 h2 노드에서 변경된 싱크의 위치정보를 알게 되어 라우팅 경로를 변경하는 모습을 보여준다.

만약 중간에 새로운 위치 정보를 받지 못하고 이전 액세스 노드로 전송되면, 이전 액세스 노드는 자신에게 전송되는 데이터를 자신의 클러스터 헤드에게 재전송한다. 클러스터 헤드는 새

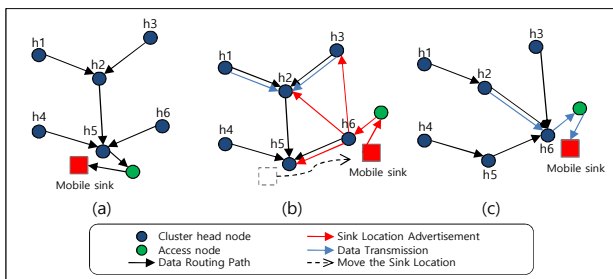


Fig. 4. Example when the node receives the information of a sink node

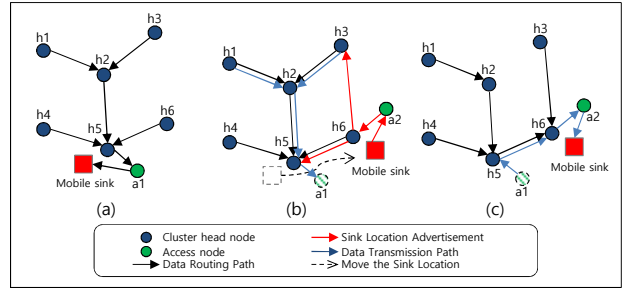


Fig. 5. Example when the data is transferred to the previous access node

로운 액세스 노드의 위치를 알고 있기 때문에 새로운 액세스 노드로 데이터를 전송하여 손실되는 데이터의 양을 최소화한다. 그림 5는 싱크의 위치가 변동되었지만, 전송 중인 데이터가 변경된 싱크의 위치를 전달 받지 못하여 기존 싱크의 위치로 전송되는 상황을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, h5 노드는 싱크의 위치 정보를 받기 전에 기존 액세스 노드인 a1 노드에게 데이터를 전송한다. 데이터를 전송받은 a1 노드는 싱크와의 연결이 끊겼기 때문에 자신의 클러스터 헤드인 h5 노드에게 데이터를 재전송하고, h5 노드는 새로운 액세스 노드인 a2 노드로 전달하여 싱크의 이동으로 인한 데이터 손실을 방지한다.

IV. Experimental Experiment

본 논문에서 제안하는 기법의 성능 평가를 위해 태양에너지 기반 WSN 시뮬레이터인 SolarCastalia[13]를 사용하였다.

Table 1. Experiment environment

Parameter	Value
Simulation time	13 days
Field size	60 m x 60 m
Topology	Random
Sensor node spec	Crossbow MICAz
Transmission range	10 m~20 m
Transmitter power	-5 dBm
Weather	Random
Data transfer rate	250 kbps
Amount of energy collection	3 mW~6 mW
Amount of energy consumption	2 mW~5 mW
Battery capacity	200 mAh
Speed of the mobile sink	5 m/round

1. Experiment Environments

시뮬레이션은 60 m x 60 m의 필드 영역에 50~200개의 노드를 랜덤하게 배치한 후 k-평균 알고리즘을 사용하여 6개의 클러스터를 구성한다. 본 논문에서 제안하는 기법의 성능 분석을 위해 다른 기법들과의 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다. 비교한 기법은 싱크의 위치를 모든 노드에게 전송하는 Flooding 기법과 폐쇄적인 링 노드를 선정하고 링 노드에게 싱크의 위치를 저장하는 Ring Routing 기법[11], 클러스터링을

기반으로 하지만 에너지 모드의 변경이 없는 HCDD 기법[5], 클러스터 헤드 노드 간 라우팅 테이블을 공유하여 최소 경로를 찾아 데이터를 전송하는 NGSPDD 기법[6]이다.

Flooding 기법은 싱크의 위치를 모든 노드에게 전송하는 기법이다. 고정된 싱크를 사용하는 무선 센서 네트워크에서는 싱크의 위치를 한 번만 전송하지만, 싱크의 위치가 계속 변하는 모바일 싱크 기반 무선 센서 네트워크에서는 싱크의 위치가 변경될 때마다 알리기 때문에 싱크 위치 알림 오버헤드가 상당히 클 것이다. Ring Routing 기법[11]은 링 구조를 만들고 링 노드들에게만 싱크의 위치를 전달하고, 센서 노드들은 가까이 있는 링 노드에게 싱크의 위치를 요청하는 기법이다. 링 구조를 만드는 데 오버헤드가 크지 않고 싱크의 위치를 빠르게 전달 받을 수 있지만, 링 노드에게 요청 패킷을 보내는 오버헤드가

발생하며 네트워크가 커질수록 요청 패킷을 보내는 오버헤드와 싱크의 위치를 알리는 오버헤드가 증가할 것으로 예상된다. HCDD 기법[5]은 노드들의 클러스터 레벨을 나눈 후 최상위 레벨의 노드들에게만 싱크의 위치를 전송하는 기법이다. 클러스터링 기반이라는 점에서 제안 기법과 유사하지만 충분한 에너지가 있다고 판단되는 노드를 클러스터 헤드로 선출하는 제안 기법과는 달리 HCDD 기법[5]은 노드의 잔여 에너지양을 고려하지 않고 클러스터 헤드를 선택하고, 액세스 노드의 개념도 포함하지 않는다. 마지막으로, NGSPDD 기법[6]은 헤드 노드의 라우팅 테이블을 공유하여 싱크까지 최소의 경로로 데이터를 전송하지만, 라우팅 테이블을 공유하는 데에 오버헤드가 생기고 싱크까지의 홉수가 적은 헤드 노드에게 데이터가 몰리는 현상이 발생할 수 있다. 자세한 실험 환경은 표 1과 같다.

2. Blackout Time Analysis

그림 6은 전체 노드 수의 변화에 따른 정전노드를 비교해 놓은 그래프이다. Flooding 기법은 싱크가 이동할 때마다 모든 노드에게 싱크의 위치 정보를 알려주기 때문에 오버헤드가 커서 정전노드가 많이 발생한다. Ring Routing 기법은 네트워크가 커질수록 싱크의 위치 알림 오버헤드가 증가하여 정전 노드가 증가하는 것을 볼 수 있다. HCDD 기법은 데이터 전송시 싱크의 위치정보를 받은 경로의 역으로 데이터를 전송하는데, 다음 노드의 에너지 상태를 전혀 고려하지 않기 때문에 잔여 에

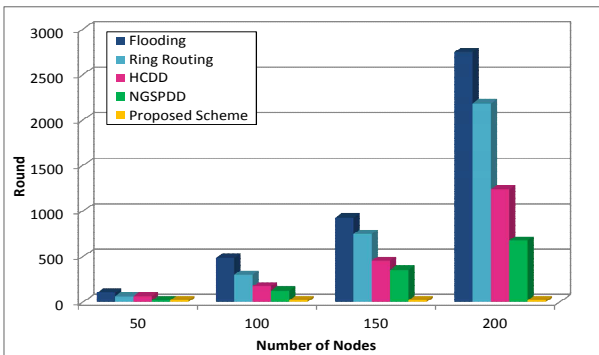


Fig. 6. Cumulative time(round) of dead nodes

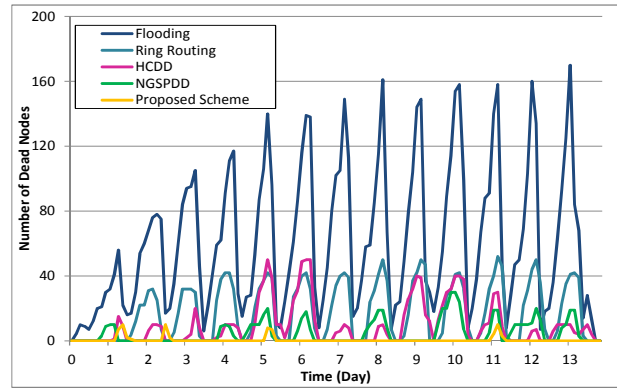


Fig. 7. Number of dead nodes over time

너지가 적은 이웃 노드라면, 정전 모드로 들어가 에너지가 노드의 기본동작을 수행할 만큼 수집될 때까지 수면 상태에 있게 된다. NGSPDD 기법은 헤드에서 싱크까지 최단 경로를 찾아야 하기 때문에 헤드 노드간 라우팅 테이블을 공유하는 데에 오버헤드가 생겨 노드의 에너지 소모가 커지고, 싱크와 가까운 헤드 노드에게 데이터가 몰리는 현상이 발생하여 노드가 정전 모드로 들어갈 가능성이 높다.

반면에 제안 기법은 싱크의 위치를 클러스터 헤드 간에만 공유하여 이를 위한 오버헤드가 작다. 또한, 잔여에너지가 많은 노드들 중에서 클러스터 헤드와 액세스 노드를 선출하고, 이들 노드의 에너지가 문턱값보다 적어지는 경우, 다른 노드로 재선출하기 때문에, 정전시간이 매우 적다.

그림 7은 노드의 개수가 200개일 때 정전 노드 발생 개수를 시간별로 관찰한 그래프이다. 태양 에너지 수집형 센서를 사용하기 때문에 낮에는 배터리가 충전되어 정전노드 개수가 감소하고 밤에는 충전되지 않아 정전노드 개수가 증가하는 모양이 주기적으로 나타난다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 제안 기법은 노드의 잔여 에너지를 고려하여 헤드와 액세스 노드를 선출하기 때문에 에너지 균형이 잘 맞춰져 정전노드가 거의 발생하지 않는다. 반면, 다른 네 가지 비교 기법들은 노드의 충전 에너지 양에 따라 정전 노드가 주기적으로 발생하는 것을 알 수 있다.

3. Data Collection Analysis

그림 8은 전체 노드 개수 변화에 따른 싱크에서의 데이터 수집량을 나타낸 그래프이다. 4.2절에서 설명 했듯이, 제안 기법은 다른 비교 기법보다 정전노드 발생이 적기 때문에 데이터 수집량을 높이는데 긍정적인 영향을 미친다. 또한, Flooding 기법, HCDD 기법, NGSPDD 기법은 싱크가 위치를 이동하게 되면 기존 싱크의 위치로 전송되던 데이터는 중간에 변경된 싱크의 위치를 받지 않는 한 제대로 전송되지 못하지만, 제안 기법의 경우 고정된 액세스 노드의 위치를 공유하고 싱크의 위치 이동에 상관없이 액세스 노드로 데이터가 전송되어, 이동된 싱크로 재전송시켜주기 때문에 손실되는 데이터 없이 싱크로의 전송이 가능하다.

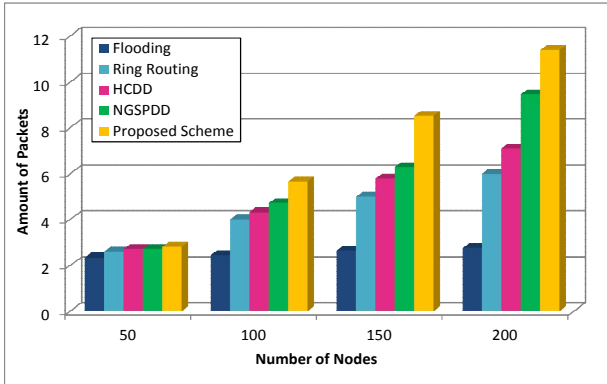


Fig. 8. Comparison of total amount of collected data

4. Latency Analysis

그림 9는 싱크의 위치 알림 횟수와 데이터가 센서 노드부터 싱크 노드까지 라우팅 되는 홉수를 기법별로 비교한 그래프이다.

데이터의 라우팅 홉수 비교 부분에서, Flooding 기법은 네트워크 외곽 노드부터 싱크 노드까지 멀티홉 방식으로 데이터가 전송되지만, 제안 기법과 HCDD 기법에서는 클러스터 멤버 노드에서 헤드 노드까지 데이터가 전송되면, 그 후엔 전송 범위가 큰 클러스터 헤드끼리 싱크로 데이터를 전송하기 때문에 라우팅 홉수가 Flooding 기법에 비해 적다. 따라서 제안 기법과 HCDD 기법에서의 라우팅 홉수가 Flooding을 사용하였을 때보다 약 14% 감소한 것을 볼 수 있다. 다만, NGSPDD 기법은 데이터가 최단 경로로 전송되기 때문에 라우팅 홉수가 적고, Ring Routing 기법은 데이터 전송 라우팅 기법에 대한 제약이 없어 본 실험에서는 가장 효율이 좋은 라우팅 기법을 사용하였기 때문에 라우팅 홉수가 가장 적게 나타났다. 하지만 최단 경로 탐색을 위한 오버헤드와 핫스팟 문제, 추가적인 싱크의 위치 알림으로 인해 정전 노드가 많이 발생하고 이에 따라 에너지 수집률도 제안 기법보다 낮다는 결과를 앞에서 볼 수 있다.

싱크의 위치 알림 횟수에서는 기법별로 큰 차이가 나타난다. Flooding 기법은 싱크의 위치가 바뀔 때마다 모든 노드에게 싱크의 위치를 알리지만, HCDD 기법과 NGSPDD 기법, 제안 기법은 클러스터 헤드에게만 싱크의 위치를 알리기 때문에 싱크의 위치를 알리는 횟수가 Flooding 기법에 비해 약 98% 감소한 것을 볼 수 있다.

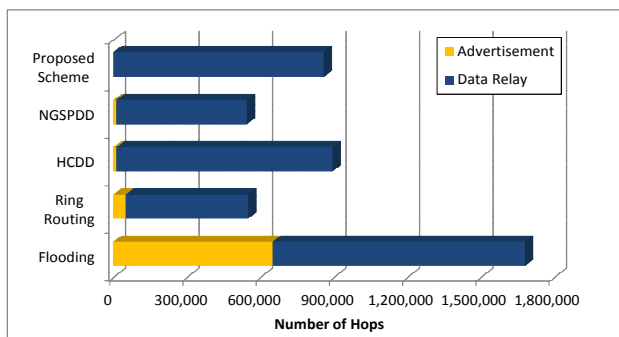


Fig. 9. Hop-counts for location advertisement and data relay

또한, 제안 기법은 이동한 싱크가 기존 액세스 노드와 통신이 가능한 경우에는 싱크의 위치를 알리지 않기 때문에 싱크의 위치가 바뀔 때마다 헤드에게 알리는 HCDD 기법과 NGSPDD 기법에 비해 싱크 위치 알림 횟수가 약 91% 감소하였다.

Ring Routing 기법은 링 노드들이 싱크의 위치를 요청한 노드들에게 추가적으로 싱크의 위치를 알리기 때문에 제안 기법이 Ring Routing 기법에 비해 싱크 위치 알림 횟수가 약 95% 감소한 것을 볼 수 있다.

V. Conclusions

본 논문에서는 모바일 싱크를 효율적으로 지원하기 위한 기법을 연구하였다. 제안 기법은 무작위로 이동하는 모바일 싱크의 위치를 알리는 데 소모되는 오버헤드를 줄이기 위하여 클러스터를 구성하여 헤드를 선출하고, 헤드들에게만 액세스 노드의 위치를 공유한다. 클러스터 헤드는 다른 노드에 비해 에너지 소모량이 많으므로 여분의 에너지가 많은 노드 중에서 선출한다. 또한, 액세스 노드의 위치를 공유할 때 헤드 간 라우팅 경로를 함께 구축하여 라우팅 경로 구축에 드는 에너지 소모를 감소시킨다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법이 기존 기법보다 에너지를 효율적으로 사용하여 정전노드가 약 90% 감소하고 결과적으로 싱크에서 수집되는 데이터가 75% 증가하는 것을 알 수 있다.

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] S. Sudevalayam, and P. Kulkarni, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 13, No. 3, pp. 443-461, Third Quarter, 2011
- [3] Y. Yang, L. Wang, D. Noh, H. K. Le and T. Abdelzaher, "SolarStore: Enhancing Data Reliability in Solar-powered Storage-centric Sensor Networks," *ACM International Conference on Mobile System, Applications and Services*, June, 2009
- [4] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi and M. B. Srivastava, "Power Management in Energy Harvesting Sensor Networks," *ACM Transaction on Embedded Computing Systems*, Vol. 6, No. 4, pp. 1-38, September, 2007
- [5] Kate Ching-Ju Lin, Po-Lin Chou and Cheng-Fu Chou, "HCDD : Hierarchical Cluster-based Data Dissemination in Wireless Sensor Networks with Mobile Sink," *Proc.*

- the International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, July, 2006
- [6] S. Oh, Y. Yim, J. Lee, H. Park and S. H. Kim, "Non-geographical Shortest Path Data Dissemination for Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks," Proc. Vehicular Technology Conference, Fall, 2011
- [7] Y. Xun-Xin and Z. Rui-Hua, "An Energy-efficient Mobile Sink Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks," in Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2011
- [8] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," in Proc. 33rd Hawaii Int. Conf. on System Sciences, ser. HICSS '00, Vol. 8, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2000, pp. 8020-8030
- [9] B. Nazir and H. Hasbullah, "Mobile Sink Based Routing Protocol (MSRP) for Prolonging Network Lifetime in Clustered Wireless Sensor Network," in Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE), 2010 Int. Conf. on, Dec. 2010, pp. 624-629
- [10] H. Lee, J. Yi, J. Kim, M. Park and D. Noh, "Energy-aware Clustering Topology Management to Support a Mobile Sink in Solar-Powered WSNs," Proc. IEEE Asia Pacific Wireless Communications Symposium, Aug, 2015
- [11] C. Tunca, S. Isik, M. Y. Donmez and C Ersoy, "Ring Routing: An Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with a Mobile Sink," IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 14, No. 9, September, 2015
- [12] H. Steinhaus, "Sur la Division des Corps Materiels en parties," Bulletin de l'Academic. Polonaise des Sciences, Vol. 4, No. 12, pp. 801-804, Oct, 1956
- [13] J. Yi, M. Kang and D. Noh, "SolarCastalia : Solar Energy Harvesting Wireless Sensor Network Simulator," International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 2015, pp 1-10, May, 2015

Authors



Eom Ji Oh received the B.S. degree in Electronic Engineering from Soongsil University, Korea, in 2016. She is Currently a M.S. student in Department of Software Convergence at Soongsil University. Her research interests include wireless sensor network, cyber physical system, embedded system software, and ubiquitous sensor network.



Minjae Kang received the B.S degree in Computer Engineering from Paichai University, Korea, in 2011. He is currently a Ph.D. candidate in Department of Electronic Engineering at Soongsil University. His research interests include cyber physical system, mobile networks and ubiquitous sensor network.



Ikkjune Yoon received the Ph.D. degree in Computer Science and Engineering from Seoul National University, Korea, in 2016. He is currently an assistant professor in Department of Smart Systems Software at Soongsil University. His research interests include wireless sensor network and embedded system software.



Dong Kun Noh received the Ph.D. degree in Computer Science and Engineering from Seoul National University in 2007. He is currently associate professor in Department of Software Convergence at Soongsil University. His primary research interests include embedded system, mobile computing, and ubiquitous sensor network.