

# Efficient Mobile Sink Location Management Scheme Using Multi-Ring in Solar-Powered Wireless Sensor Networks

Hyeok Kim\*, Minjae Kang\*\*, Ikjune Yoon\*\*\*, Dong Kun Noh\*\*\*\*

## Abstract

In this paper, we propose a multi-ring based mobile sink location scheme for solar-powered wireless sensor network (WSN). The proposed scheme maintains the multi-rings in which nodes keep the current location of sink node. With the help of nodes in multi-rings, each node can locate the sink node efficiently with low-overhead. Moreover, because our scheme utilizes only surplus energy of a node, it can maintain multiple rings without degrading any performance of each node. Experimental results show that the proposed scheme shows much better latency and scalability with lower energy-consumption than the existing single-ring based scheme.

▶ Keyword: wireless sensor networks, energy-harvesting, solar energy, mobile sink, multi-ring

## I. Introduction

무선 센서 네트워크(WSN)는 초소형, 저비용, 저전력의 센서 소자로 이루어진 네트워크로써, 그 활용 분야가 군사, 의료, 생태계 감지 등으로 다양하다[1-2]. WSN의 노드는 일반적으로 배터리로 동작하기 때문에, 제한적인 에너지 자원 문제를 극복하기 위한 연구가 광범위하게 진행되어 왔다. 기존에는 소모되는 에너지의 양을 최소화하기 위한 연구들이 주로 수행되었다. 그러나 최근에는 제한된 에너지 문제를 근본적으로 해결하고자, 환경 에너지를 포함한 주변 에너지를 수집하여 활용하는 에너지 수집형 센서 노드에 대한 연구가 활발히 수행하고 있다[3].

에너지 수집형 센서 노드는 태양, 압력, 바람, 열, 중력 등을 통해 에너지를 수집하게 되는데, 이 중 태양에너지는 에너지 밀도 및 주기성으로 인하여 WSN에 최적의 에너지원으로 생각되고 있다. 태양 에너지 기반의 센서 노드에서는 수집되는 에너지를 최대한 아껴서 사용하는 것이 목표가 아니라, 배터리 용량 및 에너지 수집 속도 등을 고려하여 최대한 효율적으로 사용하는 것이 목표가 되어야 한다.

한편, 모바일 싱크를 이용한 WSN은 기존의 고정된 위치의 싱크를 사용하는 WSN에서 발생하는 싱크 주변 노드와 외곽 노드 간의 에너지 불균형 문제를 어느 정도 해결할 수 있었다. 그러나 싱크가 무작위 경로를 이동한다면, 노드의 데이터 전송을 위하여 싱크의 위치 정보를 각 노드에 알리는 기법이 필요하게 된다. 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 모바일 싱크의 위치 정보 전파에 드는 비용을 절감시키려는 연구가 현재 활발히 진행되고 있으며, 일반적으로 그리드, 클러스터링, 영역 등을 이용한 계층적 방법이 많이 연구되고 있다[4]. 특별히, 영역 기반 기법의 경우, 다른 기법들에 비해 구축하기 쉽지만, 네트워크 크기가 커질 때, 성능 저하가 발생하지 않도록, 확장성에 대한 고려가 반드시 필요하다.

\* First Author: Hyeok Kim, Corresponding Author: Dong Kun Noh

\*Hyeok Kim (hk@soongsil.ac.kr), Dept. of Software Convergence, Soongsil University

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

\*\*\*Ikjune 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. 09. 27, Revised: 2017. 10. 10, Accepted: 2017. 10. 16.

• This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning(No. NRF-2016R1C1B1015937)

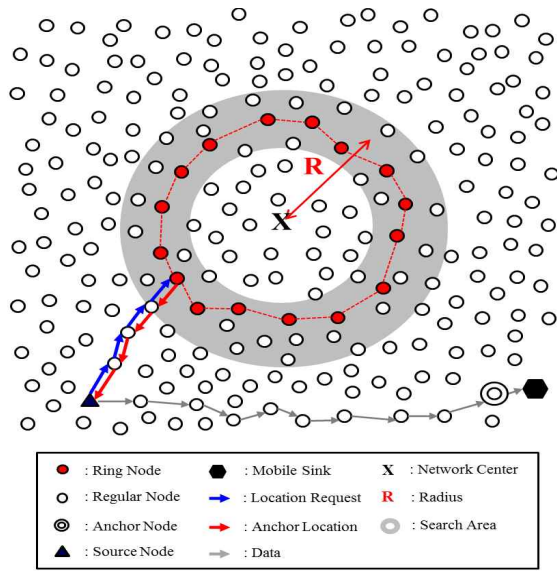


Fig. 1. Overview of ring routing[5] scheme

본 연구는 영역기반의 기법 중 링 라우팅[5] 기법을 참고하고 있으며, 이 기법은 링 노드, 앵커 노드, 일반 노드로 구성되며, 그림 1과 같이 네트워크 중앙 x의 위치로부터 반지름 R로 회색의 탐색영역을 이용한다. 이 탐색영역에 있는 노드 중 가까운 노드끼리 서로 연결하여 링을 구성하게 되고, 링을 구성한 노드(링 노드)만이 모바일 싱크의 위치 정보를 유지하게 된다.

링 노드 중 에너지가 특정 값 이하로 내려가게 되면 자신의 이웃 노드 중에서 링 중앙에서 자신보다 멀리 있는 노드를 선택하여 링 노드로 지정하고, 자신은 일반 노드로 동작한다. 이를 반복하면 링은 점점 네트워크 바깥쪽으로 확장하게 된다. 확장을 마치면 모든 대부분의 노드가 링 노드로 한 번씩 동작하게 된다. 따라서 에너지가 균형적으로 소모되었을 것이므로, 이번에는 네트워크 중앙의 방향으로 링을 축소하게 된다. 이렇게 링의 확장과 축소의 과정을 거치면서 에너지의 밸런스를 유지하게 된다.

모바일 싱크로부터 가장 가까운 노드는 앵커 노드로 선정되고, 이 앵커 노드는 자신의 위치 정보를 네트워크 중앙의 방향과 네트워크 바깥쪽 방향으로 전송하게 되는데, 이렇게 전송하면 그 위치 정보가 반드시 링 노드 중 하나에 전송되기 때문이다. 이를 받은 링 노드는 링을 구축하고 있는 다른 링 노드에 위치 정보를 전파하여, 모든 링 노드가 앵커 노드의 위치 정보를 공유하게 된다.

그림 1과 같이, 데이터를 전송하고자 하는 소스 노드는 싱크로의 데이터 전송을 위해 패킷의 목적지인 싱크의 위치 정보가 필요하고, 이를 위하여 네트워크 중앙의 방향과 네트워크 바깥쪽 방향으로, 앵커 노드의 위치 정보를 요구하는 패킷을 보내고(그러면 반드시 링과 만나는 것이 보장됨), 위치 정보에 대한 응답 패킷을 받는다. 위치 정보를 받은 후에는 위치기반 라우팅 기법을 활용하여 앵커 노드로 데이터를 전송하게 된다. 이 기법의 가장 큰 문제는 확장성이 없다는 것이다. 즉, 네트워크의 크기가 커질수록 위치 정보를 얻기 위한 패킷의 홉 수가 증가하여 에너지

를 포함한 오버헤드가 커지고, 이는 각 노드의 에너지 소모속도를 증가시켜 최종적으로 네트워크의 성능 저하로 이어지게 된다.

본 연구에서는 태양에너지 수집형 WSN의 에너지 모델을 활용하여, 여분의 에너지를 링을 구성하는 데 활용하도록 하였다. 여분의 에너지만을 사용하기 때문에 각 노드의 성능에는 영향을 주지 않으면서, 동시에 여러 개의 링을 유지할 수 있다. 따라서 기존의 링 라우팅 기법과 달리 네트워크의 크기가 커져도 성능저하가 발생하지 않으므로, 확장성이 매우 좋다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 태양 에너지 수집형 WSN 관련 연구와 모바일 싱크 위치 관리를 위한 기법에 관해서 서술하며, 3장에서는 제안기법인 태양 에너지 수집형 WSN에서 멀티 링을 이용한 모바일 싱크 위치 관리기법을 서술한다. 4장에서는 제안기법과 다른 기법들의 성능을 비교하며, 5장에서 결론을 내린다.

## II. Related Works

본 장에서는 태양에너지 수집형 WSN과 모바일 싱크의 위치 정보 관리를 위한 영역기반의 계층적 기법에 관해 기술한다.

### 1. Solar-Powered WSNs

배터리 기반의 무선 센서 노드는 수명이 한정되어 있어, 이를 극복하기 위한 노력으로 에너지 수집형 센서 노드들이 주목받아 왔다. 이러한 에너지 수집형 센서 노드들은 주기적 또는 산발적으로 에너지를 수집하므로, 하드웨어적인 문제가 없다면, 센서의 영속적인 수명을 가지게 된다. 특히, 태양 에너지는 주기적으로 수집할 수 있을 뿐 아니라, 표 1[6]과 같이 다른 에너지 자원보다 높은(센서 노드의 에너지 소모를 만족시킬 수 있을 만한) 파워 밀도를 가지고 있기 때문에 많은 주목을 받았으며, 이미 Helimote[7]를 비롯한 다양한 태양 에너지 수집형 센서 노드가 개발되었다.

Table 1. Power density by energy source

Energy Source	Power Density
Solar cells (outdoors at noon)	15 mW/cm <sup>2</sup>
Piezoelectric (shoe inserts)	330 uW/cm <sup>3</sup>
Vibration (microwave oven)	116 uW/cm <sup>3</sup>
Thermoelectric (10 °C gradient)	40 uW/cm <sup>2</sup>
Acoustic noise (100 dB)	960 nW/cm <sup>3</sup>

수집할 사항은 태양 에너지는 주기적으로 수집되지만, 수집되는 에너지양은 정확히 예측할 수 없다는 것이다. 따라서 수집되는 태양에너지를 최대한 효율적으로 활용하는 에너지 사용 스케줄링이 필요하다. 예를 들어, 에너지 수집률이 높은 낮 기간 동안 에너지 사용을 아낀다면 수집되는 에너지가 재충전 배터리의 용량을 초과하여, 배터리에 저장되지 못하고 버려질 수

있다. 반대로, 이렇게 버려지는 에너지를 최소화하고자 낮 기간 동안 에너지 사용을 최대화한다면 에너지 수집이 없는 밤 기간에는 정상적인 동작을 하지 못할 수도 있다. 따라서 기존의 배터리 기반 WSN에서는 네트워크 수명을 최대화하기 위하여 각 노드에서 에너지 사용을 최소화하는 기법들이 최소화하는 기법들이 연구되었다면, 연속적으로 동작할 수 있는 태양에너지 수집형 WSN에서는 수집되는 에너지의 속도 및 재충전 배터리의 용량을 고려하여 수집되는 에너지의 활용을 최대화할 수 있는 기법들이 연구되고 있다[8-9].

## 2. Location Management for a Mobile Sink

모바일 싱크 기반 WSN은 싱크 노드를 이동함으로써 싱크노드로 데이터를 전달하기 위한 에너지 소모를 분산시켜, 기존의 고정된 싱크 주변 노드와 외곽 노드 간에 발생하던 에너지 불균형 문제를 어느 정도 해결할 수 있었다. 그러나 고정된 경로를 순회하지 않고, 무작위의 위치를 순회하는 모바일 싱크를 가진 WSN에서는 모바일 싱크의 위치추적에 대한 추가적인 에너지가 필요하다[10].

따라서 에너지 효율적으로 싱크 노드의 위치를 전파하는 기법들이 많이 연구되었는데, 그중에서도 여러 개의 계층으로 노드를 나누어, 특정 계층에서만 싱크의 위치를 관리하는 계층적 기법들이 가장 많이 연구되고 있다. 계층적 기법에는 그리드, 클러스터링, 영역 등을 기반으로 계층을 나누는 방식이 있다. 그러나 그리드 기법의 경우, 구축비용 및 고립 노드의 발생 등과 같은 문제가 있고, 클러스터링 기반 기법들은 클러스터링 구축과 관련한 높은 오버헤드 문제가 있다. 영역기반 기법은 특정 영역 내의 노드를 상위계층 노드로 지정함으로써, 위와 같은 문제들이 상대적으로 적다. 다음은 영역기반의 대표적 기법들이다.

- LBDD(Line-Based Data Dissemination)[11] : 네트워크의 중앙 평행한 두 직선 사이에 있는 노드를 인라인 노드라고 하며, 이 노드가 모바일 싱크에 대한 정보를 공유하고 있다. 데이터를 전송하고자 하는 소스 노드는 이 인라인 노드에 데이터를 전송하며, 이를 받은 인라인 노드는 모바일 싱크에게 데이터를 전송하면서 데이터 전송이 완료된다.
- RailRoad[12] : 전체 네트워크 모양에 따른 레일을 구축하며, 이 레일 안에 있는 노드를 레일 노드라고 부른다. 센서 노드가 데이터를 전송하고자 한다면, 메타 데이터 정보를 가장 가까운 레일 노드에게 전송한다. 이를 받은 레일 노드는 레일을 자신의 통신 범위 크기의 스테이션으로 나누어 구성하고, 각 스테이션에 이 메타데이터 정보를 공유한다. 싱크에서는 이 메타데이터에 대해 레일에 쿼리하고 해당되는 스테이션 노드에 도달하면, 소스 노드에게 모바일 싱크의 위치를 알리고 데이터 전송이 시작된다. 즉, 처음에 소스 노드가 메타 데이터를 전송했던 가까운 레일 노드가 소속된 스테이션에 쿼리가 도착하면, 모바일 싱크의 위치를 알리고 데이터 전송을 시작한다.

앞서 설명한 LBDD는 인라인 노드에 많은 데이터가 한쪽으로 몰리지 않을 만큼의 넓은 영역을 설정하고, RailRoad는 메타 데이터가 있는 노드를 만날 수 있게 레일 방향을 설정해야 성능저하가 발생하지 않는다. 그러나 본 논문이 기반을 두고 있는 링 라우팅 기법은 이들과 달리 영역 설정 시 특별한 고려사항이 없으며, 또한 링의 확장과 축소를 통해 각 노드의 에너지를 고루 사용할 수 있다. 그러나 주지할 사항은 네트워크 영역이 커지게 된다면 위치 정보를 얻기 위한 오버헤드가 매우 커질 수 있다는 점이다.

## III. The Proposed Scheme

### 1. Energy Threshold

[13]의 연구에서는 노드의 현재 에너지양이 노드의 기본동작을 수행하기에 충분한지를 판단하기 위한 에너지 문턱 값을 수학적으로 제시하고 있는데, 문턱 값은 다음 수식 (1)과 같다.

$$E_{\text{threshold}}(i) = \frac{P_{\text{sys}}(i)}{P_{\text{charge}}(i)} \cdot C(i) \quad (1)$$

여기서,  $P_{\text{sys}}(i)$ 은 시스템 에너지 소모율,  $P_{\text{charge}}(i)$ 은 에너지 수집률,  $C(i)$ 은 배터리 용량을 나타낸다. 즉, 현재 에너지양이 문턱 값  $E_{\text{threshold}}(i)$ 보다 크면 노드의 기본 동작(센싱, 저장, 전달)을 수행하는데 충분한 에너지가 존재하므로 다른 추가적인 일을 수행해도 된다는 의미이다.

본 연구에서는 이를 이용하여, 각 노드  $n_i$ 에서 주기적으로 문턱 값  $E_{\text{threshold}}(i)$ 을 계산하고, 이를 현재 에너지양과 비교한다. 현재 에너지양이 문턱 값보다 크다면, 링 노드로서의 역할을 할 만한 충분한 에너지가 있다고 판단한다.

주의할 것은, 에너지 소모율이 수집률보다 크다면 문턱 값이 배터리 총량보다 커지게 되어 항상 링 노드로 동작할 수 있는 가능성이 없게 된다. 따라서 노드의 동작 시간 조정(Duty-cycle Control)이나 센싱 주기 조절(Sensing-rate Control) 등을 통하여, 노드의 기본동작을 수행할 때의  $P_{\text{sys}}(i)$ 가 항상  $P_{\text{charge}}(i)$ 보다 작도록 초기 세팅을 하여야 한다.

### 2. Ring Construction

제안기법에서는 여러 개의 링을 생성하여 싱크 노드의 위치를 전파하는 데, 그림 2는 제안기법이 3개의 링을 생성했을 때를 보여준다. 그림 2의 고정된 탐색영역(Search Area)에서 초기 링이 구축되고, 이 링이 확장되는 과정에서 다시 탐색영역에서 새로운 링이 구축된다.

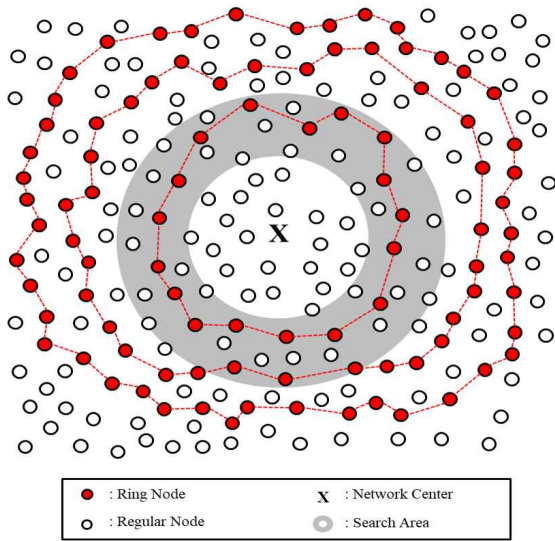


Fig. 2. Ring construction of proposed scheme

새로운 링을 구축하기 위하여, 그림 2의 탐색영역 노드 중에서 잔여 에너지양  $E_{remain}(i)$ 가 수식 (2)을 만족하는 노드만 선택하여 링의 구축을 시도한다.

$$E_{remain}(i) \geq E_{threshold}(i) \quad (2)$$

현재 시점에서 링이 구축되지 않는다면, 다음 주기에 다시 구축을 시도한다. 3.1에서 설명한 것처럼 노드가 기본동작을 수행할 때(일반노드로 동작할 때에는  $P_{sys}(i)$ 가 항상  $P_{charge}(i)$ 보다 작기 때문에 시간이 지날수록  $E_{remain}(i)$ 의 값이 커져서 결국 링 노드로 동작할 수 있을 만한 에너지를 보유하게 된다. 따라서 시간이 지나면 반드시 링 구축이 완료됨을 보장할 수 있다.

주의할 것은 노드가 처음 배치되어 네트워크를 형성하는 초기 과정에서는, 탐색영역에서 수식 (2)을 만족하는 에너지가 충분한 노드가 링을 구축할 만큼 존재하지 않을지라도, 반드시 탐색영역에 하나의 링을 만들어야 한다는 점이다. 이는 네트워크에서 반드시 하나의 링이 존재해야 모바일 싱크의 위치를 알릴 수 있기 때문인데, 이를 위하여 수식 (2)을 만족하지는 못하지만 이웃 노드 중에서 가장 에너지가 충분한 노드를 링 노드로 선택하는 방식을 사용하여 초기 링을 구축한다.

### 3. Ring Extension

그림 3은 새로운 링 노드의 선출과 이를 통한 링 확장을 보여주고 있다. 그림 3에서 링 노드로서 동작하던 노드 A는 시간이 지남에 따라 위치 정보 전파에 많은 에너지를 소모하였을 것이므로, 잔여 에너지가 감소하여 수식 (3)을 만족할 수 있다. 이는 더 링 노드로서의 역할을 수행하기에 에너지가 충분하지 않으므로 기본 동작을 수행하여 에너지를 최소화해야 함을 의미한다.

$$E_{remain}(i) < E_{threshold}(i) \quad (3)$$

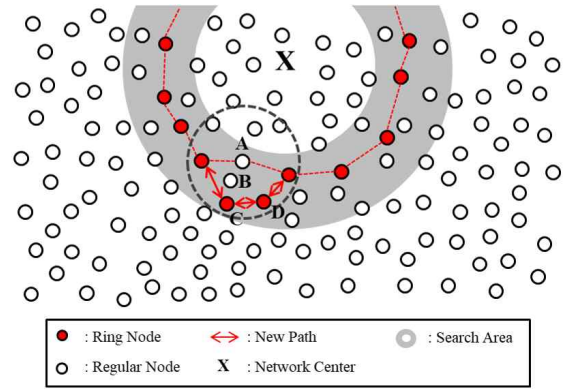


Fig. 3. Ring expand of proposed scheme

따라서 A 노드는 링 노드로서의 동작을 중지하고, 자신보다 중앙으로부터 거리가 멀고(링의 바깥쪽 노드), 잔여 에너지양이 수식 (2)을 만족하는 노드를 선택한다. 즉, 그림 3에서 링 노드로서 역할을 수행하던 노드 A의 통신 범위 내에서 링 외부에 존재하는 노드는 노드 B, C, D 이며, 이 중 노드 B는 잔여 에너지가 에너지 문턱 값보다 적고, 노드 C와 노드 D가 잔여 에너지가 에너지 문턱 값이 큰 노드라고 가정한다면, 노드 C, 노드 D가 링 노드로서의 역할을 수행한다.

만약 기존 링 노드로 사용되던 노드 A가 에너지 부족 상태가 되어, 링 바깥의 다른 노드를 선택함으로써 링을 확장하여야 하는데, 링 노드로 동작할 만큼 충분한 에너지를 가진 링 바깥쪽 이웃 노드가 없다면, 그 노드 중 가장 잔여 에너지가 많은 노드를 선택할 수밖에 없다.

### 4. Ring Destroy

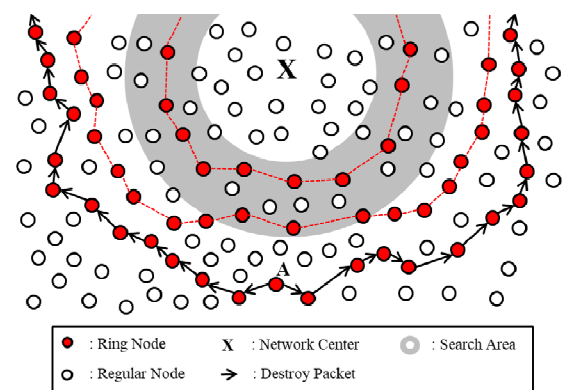


Fig. 4. Ring destroy of proposed scheme

그림 4와 같이 링들이 확장되고 있을 때, 링 노드인 노드 A의 에너지양이 에너지 문턱 값보다 작게 되었다면, 네트워크의 끝 영역에 맞게 되어 링이 확장을 과정을 거치지 못하게 된다. 이처럼 네트워크 끝 영역에 맞닿은 경우 링을 해제한다.

링을 해제할 때, 링의 해제를 시작하는 노드 A가 같은 링을 구성하고 있던 이웃 링 노드에 링을 해제하자는 패킷을 보내고,

이를 받은 링 노드도 자신의 이웃 링 노드에 패킷을 재전송한다. 이 과정에서 패킷을 전송 후 각 링 노드는 일반노드로 역할을 변경하여, 링 노드의 역할을 수행하지 않는다.

만약, 링이 확장되어 해제되는 시점에 다른 링이 존재하지 않는다면, 링을 해제하지 않고 기존 링 라우팅 기법과 마찬가지로 축소하는 과정을 거쳐야 한다. 이는 네트워크에 반드시 하나의 링이 있어야 모바일 싱크로 데이터를 전송할 수 있기 때문이다.

### 5. Acquiring Anchor's Position

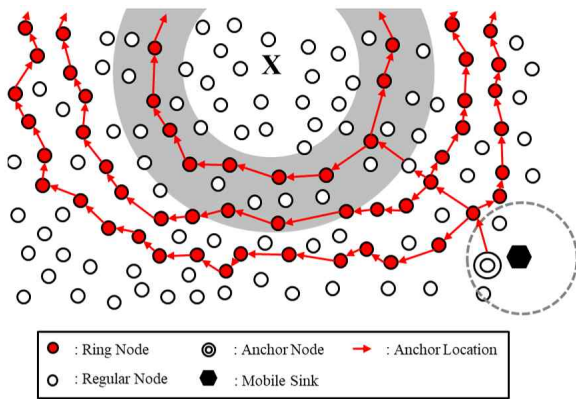


Fig. 5. Dissemination of anchor node's position

앵커 노드는 싱크와 직접 통신하는 노드라써, 수집된 센싱 데이터는 모두 앵커노드로 전송되어야 한다. 그림 5는 이러한 앵커 노드의 선택과 위치 정보 전파를 보여준다. 모바일 싱크의 가까운 이웃 노드가 앵커 노드로 선택되며, 이 앵커 노드는 구축된 링에 선택된 앵커 노드의 위치 정보를 전송한다. 모바일 싱크가 움직일 경우, 모바일 싱크와 앵커 노드가 통신 거리를 벗어난다면 새로운 앵커 노드를 선택하게 되며, 새롭게 선출된 앵커 노드는 자신의 위치 정보를 전송하게 된다. 이 과정 중, 재선출된 앵커 노드는 기존 앵커 노드에 앵커 노드가 변경되었음을 알리는 패킷에 자신의 위치 정보를 보내게 되며, 이를 받은 기존 앵커 노드는 일반 노드로 역할을 변경한다. 그러나 모바일 싱크가 통신을 이루는 범위를 벗어나지 않았다면, 앵커 노드를 재선출하지 않는다.

한편, 앵커 노드가 각각의 링에 싱크의 위치를 전달하는 과정에서, 그 경로에 있는 노드의 이웃 노드는 싱크의 위치 정보를 들을 (overhearing) 수 있으므로, 추후 데이터 전송 시 링으로부터 위치 정보 요청 및 획득에 대한 과정을 거치지 않아도 된다.

### 6. Data Transmission

데이터를 전송할 소스 노드는 모바일 싱크의 현재 위치 정보가 필요하다. 위치 정보를 획득하기 위하여, 그림 6에서 세모로 표시된 소스 노드가 네트워크의 중심의 방향과 외곽 방향으로 위치 정보 요청 패킷을 보낸다. 이렇게 하면 적어도 하나의 링을 만나게 되고, 싱크의 위치정보를 알 수 있다. 이후 가장 가까

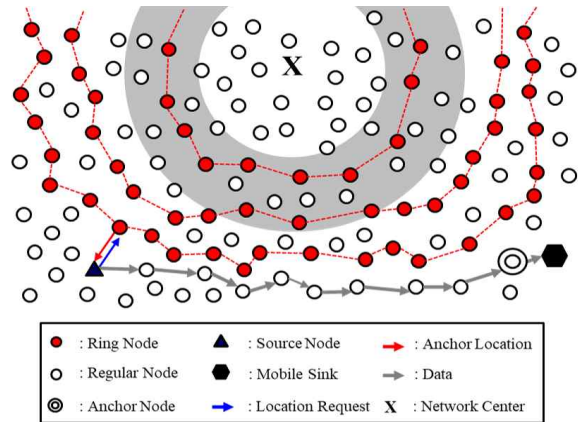


Fig. 6. Request/response of anchor node's position, and data transmission

운 링 노드로부터 받은 응답 패킷에 포함된 앵커 노드의 위치 정보를 바탕으로 위치 기반 라우팅 기법을 수행한다.

기존 기법에서는 링이 하나만 존재했기 때문에, 네트워크의 크기가 커지면 싱크의 위치를 알아내기 위한 오버헤드가 선형적으로 증가할 수밖에 없다. 그러나 제안 기법에서는 동시에 여러 개의 링을 유지할 수 있기 때문에, 기존의 링 라우팅 기법과 달리 네트워크 크기에 따른 오버헤드 증가가 없다.

### 7. Data Forwarding to Prevent Data Loss

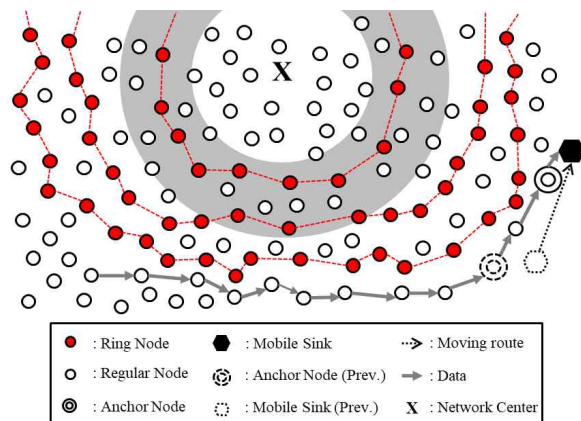


Fig. 7. Data forwarding when changing anchor nodes

앞에서 기술한 것처럼, 소스 노드는 링 노드로부터 앵커 노드의 위치를 획득하여 이를 기반으로 앵커 노드 방향으로 데이터를 전송하게 된다. 그러나 그림 7과 같이 데이터가 전송되던 도중에 모바일 싱크가 이동하여, 기존에 선택되었던 앵커 노드의 통신영역을 벗어날 수도 있다. 이 경우에는 모바일 싱크와 앵커 노드의 통신 거리에 따라 앵커노드를 재선출하는 과정에서 기존 앵커 노드는 새로운 앵커 노드의 위치 정보를 알게 되므로, 이 정보를 바탕으로 추후 도착하는 데이터를 새로운 앵커 노드로 전달(forwarding)한다. 이를 통해, 데이터 전송 중 싱크가 이동했을 경우에도 데이터 손실을 막을 수 있게 된다.

### IV. Performance Evaluation

본 논문에서 제안하는 기법의 성능 평가를 위해 태양에너지 기반 WSN 시뮬레이터인 SolarCastalia[14]를 사용하였다.

#### 1. Simulation Environments

Table 2. Experimental environment

Parameter	Value
The number of nodes	200-800
Size of topology	4900-19600 m <sup>2</sup>
TX Energy	0.0000016704 J/byte
RX Energy	0.0000018912 J/byte
Transmission Speed	250 kbps
Radius of ring	15 m
Range of ring	5 m
Sensing data size	64 bytes
Battery capacity	200 mAh
Speed of mobile sink	900 m/hour
Simulation time	7 days

시뮬레이션에서 노드 200 ~ 800개를 배치하였으며, 7일 동안 실험을 진행하였다. 제안기법의 성능평가를 위하여 플러딩 기법과 기존의 링 라우팅과 비교하였으며, 자세한 시뮬레이션 환경은 표 2와 같다.

#### 2. Blackout Nodes

Table 3. The number of average blackout nodes by network size

scheme nodes	Flooding	Ring routing	Proposed scheme
200	25.93	0	0
400	71.12	9.43	0.58
600	129.20	46.83	9.28
800	195.56	100.93	46.50

표 3은 네트워크 크기가 증가함에 따라 7일 동안 발생한 평균 정전 노드 수를 보여준다. 측정결과, 전체 노드가 400개의 경우, 제안기법이 플러딩 기법과 링 라우팅 기법보다 약 99%, 약 94%가 감소하였다. 또한, 전체 노드가 600개인 경우, 제안기법이 플러딩과 링 라우팅 기법보다 약 93%, 약 80%가 감소하고 있으며, 네트워크의 크기가 커지더라도 플러딩 기법과 링 라우팅 기법에 비해 적은 정전 노드가 발생하고 있다.

그림 8은 노드 수가 400개일 때, 시간에 따른 정전 노드 수를 나타낸 것이다. 플러딩 기법은 많은 정전 노드가 발생하고 있으며, 기존의 링 라우팅과 제안기법은 플러딩 기법에 비해 적은 정전 노드가 발생하고 있다. 또한, 기존 링 라우팅 기법보다 제안기법이 정전 노드가 적게 발생하고 있는데, 이는 위치 정보 전파에 필요한 링을 여러 개 생성함으로써, 에너지를 효율적으로 사용했기 때문으로 분석된다.

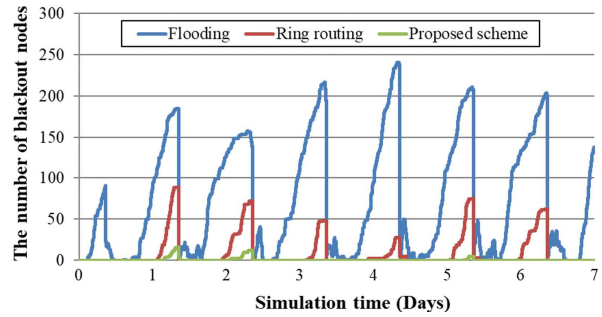


Fig. 8. Number of blackout nodes by time

#### 3. Amount of Data Collection

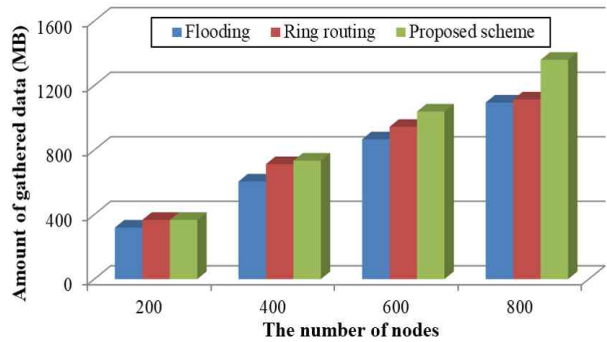


Fig. 9. Amount of gathered data by network size

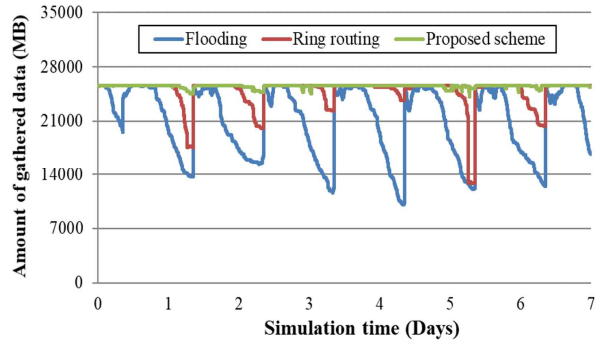


Fig. 10. Amount of gathered data by time

그림 9는 네트워크 크기에 따른 데이터 수집량을 나타낸다. 정전 노드의 수와 마찬가지로 전체 노드가 400개의 경우, 제안기법의 데이터 수집량이 플러딩 기법과 링 라우팅 기법보다 약 21%, 약 3%가 증가하였음을 알 수 있고, 네트워크 크기가 커짐에 따라 차이가 더욱 커졌다.

그림 10은 노드 수가 400개일 때, 시간에 따른 데이터 수집량을 나타낸 것이다. 기존의 링 라우팅과 제안기법은 플러딩 기법에 비해 많은 데이터 수집량을 보이고 있다. 또한, 기존 링 라우팅 기법에 비해 제안기법이 더 많은 데이터 수집량을 수집하고 있으며, 이는 멀티 링을 통한 위치관리에 에너지를 효율적으로 사용하여, 정전 노드가 줄어들어 통신이 원활했기 때문으로 분석된다.

#### 4. Scalability

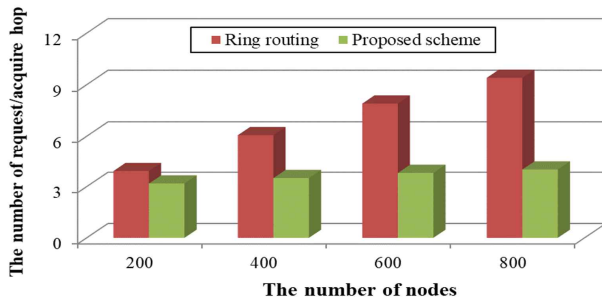


Fig. 11. Number of hops for getting the sink position by network size

그림 11과 표 4는 네트워크 크기에 따른 기존의 링 라우팅 기법과 제안기법의 링으로부터 위치 정보 요청/획득을 위한 홉의 수를 나타낸다. 제안 기법과 기존 링 라우팅 기법을 비교한 결과, 두 기법의 홉 수 차이가 노드 수가 200개인 경우에는 약 23%, 노드 수가 400개인 경우에는 73%, 노드 수가 600개인 경우에는 약 112%, 노드 수가 800개인 경우에는 약 145%로 나타났으며, 네트워크의 크기가 커짐에 따라서 차이가 커졌다. 이러한 결과는 기존의 링 라우팅 기법과 달리 네트워크의 크기가 커져도 위치 정보 요청/획득을 위한 오버헤드가 크게 늘지 않았기 때문이다. 즉, 위치 정보 요청/획득에 대한 적은 홉을 거쳤다는 것이다. 또한, 여분의 에너지만을 사용하여 링을 구축하기 때문에 각 노드의 성능에는 영향을 주지 않으면서, 동시에 여러 개의 링을 유지할 수 있었기 때문으로 분석된다.

Table 4. The number of hops for getting the sink position by network size

nodes \ scheme	Ring routing	Proposed scheme
200	3.91	3.18
400	6.06	3.51
600	7.90	3.71
800	9.40	3.83

#### V. Conclusions

태양에너지 수집형 센서 네트워크에서는 에너지가 주기적으로 수집되므로, 이에 관한 활용도를 높이는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 수집 에너지를 모바일 싱크의 위치 정보를 효율적으로 제공하기 위한 링을 구성하는 데 활용하도록 하였다. 노드의 기본동작에는 영향을 주지 않기 위하여 여분의 에너지만을 사용하여 링을 구성하므로, 각 노드의 성능에는 영향을 주지 않는다. 또한, 동시에 여러 개의 링을 유지할 수 있기 때문에, 기존의 링 라우팅 기법과 달리 네트워크의 크기가 커져도 모바일 싱크의 위치확인으로 인한 성능저하가 발생하지 않으므로, 확장성이 좋음을 확인할 수 있었다.

#### REFERENCES

- [1] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer networks*, Vol. 52, No. 12, pp. 2292-2330, August 2008.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor network: a survey," *Computer networks*, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, March 2002.
- [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, Third Quarter 2011.
- [4] 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.
- [5] 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, pp. 1947-1960, September 2015.
- [6] I. Stojmenovic, "Handbook of sensor networks: Algorithms and architectures," Wiley, pp. 75-100, 2005.
- [7] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava, "Power management in energy harvesting sensor networks," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, Vol. 6, No. 4, December 2007.
- [8] S. Jeong, H. Kim, D. Noh, and I. Yoon, "Adaptive Data Aggregation and Compression Scheme for Wireless Sensor Networks with Energy-Harvesting Nodes," *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, Vol. 22, No. 3, pp. 115-122, July 2017.
- [9] E. Oh, M. Kang, I. Yoon, and D. Noh, "Cluster-Based Mobile Sink Location Management Scheme for Solar-Powered Wireless Sensor Networks," *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, Vol. 22, No. 9, pp. 33-40, September 2017.
- [10] M. I. Khan, W. N. Gansterer, and G. Haring, "Static vs. mobile sink: The influence of basic parameters on energy efficiency in wireless sensor networks," *Computer Communications*, Vol. 36, No. 9, pp. 965-978, May 2013.
- [11] E. B. Hamida and G. Chelius, "A Line-Based Data Dissemination protocol for Wireless Sensor Networks with Mobile Sink," *IEEE International Conference on Communications*, Beijing, China, May 2008.
- [12] J. Shin, J. Kim, K. Park, and D. Park, "RailRoad: Virtual Infrastructure for Data Dissemination in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, pp. 168-174, Montreal,

Canada, October 2005.

- [13] Y. Yang, L. Wang, D. Noh, H. K. Le, and T. F. Abdelzaher, "SolarStore: Enhancing Data Reliability in Solar-powered Storage-centric Sensor Networks," Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, Applications, and Services, pp. 333-346, Kraków, Poland, June 2009.
- [14] J. Yi, M. Kang, and D. Noh, "SolarCastalia: Solar Energy Harvesting Wireless Sensor Network Simulator," International Journal of Distributed Sensor Networks, Hindawi, Vol. 2015, pp. 1-10, May 2015.

### Authors



Hyeok Kim received the B.S. degrees in Information and Communication Engineering from Honam University in 2016. He is currently a M.S. Student in Department of Software Convergence at Soongsil University. His research interests include cyber physical system, embedded system software, and wireless sensor networks.



Minjae Kang received the B.S. degrees 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.



IkJune 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 networks 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 networks.