

Adaptive Data Aggregation and Compression Scheme for Wireless Sensor Networks with Energy-Harvesting Nodes

Semi Jeong*, Hyeok Kim**, Dong Kun Noh***, Ikjune Yoon****

Abstract

In this paper, we propose an adaptive data aggregation and compression scheme for wireless sensor networks with energy-harvesting nodes, which increases the amount of data arrived at the sink node by efficient use of the harvested energy. In energy-harvesting wireless sensor networks, sensor nodes can have more than necessary energy because they harvest energy from environments continuously. In the proposed scheme, when a node judges that there is surplus energy by estimating its residual energy, the node compresses and transmits the aggregated data so far. Conversely, if the residual energy is estimated to be depleted, the node turns off its transceiver and collects only its own sensory data to reduce its energy consumption. As a result, this scheme increases the amount of data collected at the sink node by preventing the blackout of relay nodes and facilitating data transmission. Through simulation, we show that the proposed scheme suppresses the occurrence of blackout nodes and collect the largest amount of data at the sink node compared to previous schemes.

▶ Keyword : Wireless sensor network, Energy-harvesting, Aggregation, Compression, Energy-aware

I. Introduction

무선 센서 네트워크는 군사 경계, 재난 감지나 환경 모니터링 등과 같이 광범위하고 사람이 접근하기 어려운 환경에서 데이터를 수집하기 위해 사용되어 왔다. 이러한 무선 센서 네트워크는 센서 노드들을 이용하여 환경 정보를 수집하고, 이를 멀티홉 방식으로 싱크 노드에 전달한다. 이 센서 노드는 제한된 용량의 배터리, 작은 메모리 용량, 느린 처리 속도 등 하드웨어 측면에서 많은 제약 조건을 가진다. 특히, 노드의 가용 에너지가 제한되어 있기 때문에, 네트워크의 수명이 제한되어 있고, 이로 인해 네트워크의 유지보수나 재설치의 비용이 크다. 이를 극복하기 위해, 노드의 에너지 소비를 최소화하는 연구들이 많이 진

행되어 왔다[1-6].

노드의 제한된 에너지 문제를 극복하기 위한 방법 중 하나로 주변 환경으로부터 에너지 수집이 가능한 에너지 수집형 센서 노드를 이용하는 방법이 주목받고 있다[7]. 에너지 수집형 센서 노드는 태양, 진동, 열 등을 자원으로 하여 얻어진 에너지를 수집함으로써 이론적으로 무한히 동작할 수 있다. 그럼에도 불구하고 에너지 수집형 센서 노드들은 에너지 소모가 클 경우, 정전 상태가 될 수 있고, 반대로 과도하게 수집된 에너지가 배터리 용량을 넘어서 버려지는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 에너지가 지속적으로 수집된다고 하더라도 신중히 에너지를 관

• First Author: Semi Jeong, Corresponding Author: Ikjune Yoon

*Semi Jeong (semi0820@ssu.ac.kr), Dept. of Software Convergence, Soongsil University

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

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

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

• Received: 2017. 01. 20, Revised: 2017. 02. 13, Accepted: 2017. 03. 22.

• This research was supported by the MSIP(Ministry of Science, ICT and Future Planning), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program (IITP-2016-H8501-16-1008) supervised by the IITP(Institute for Information & communications Technology Promotion).

리해야 한다. 이에 따라, 기존의 배터리를 이용한 무선 센서 네트워크에서는 에너지 소비의 최소화가 목표였다면, 에너지 수집형 센서 네트워크에서는 영원히 동작할 수 있는 범위 내에서 효율적인 에너지 소비에 초점을 맞추고 있다.

한편, 무선 센서 네트워크에서는 센서 노드에서 싱크 노드까지 중계 노드를 통해 데이터를 전달하는데, 싱크 노드에 가까운 노드일수록 전달해야 할 데이터양이 증가하므로 바깥쪽의 노드에 비해 에너지가 쉽게 고갈될 수 있다. 이러한 노드들의 에너지 소모를 줄이기 위한 방법으로 데이터 병합과 압축을 고려할 수 있다[8,9]. 센서 노드에서 수집된 데이터를 병합하고 압축함으로써 전송하는 데이터양을 줄일 수 있기 때문에, 이를 전달하는 중계 노드의 부하를 줄일 수 있고 이로 인해 중계 노드의 에너지 소모를 줄일 수 있다. 단, 데이터의 압축에 소모되는 에너지양이 무시할 수 없을 만큼 크기 때문에 여분의 에너지가 있을 경우에만 적용해야 한다.

본 논문에서는 에너지 수집형 무선 센서 네트워크에서 충전되는 에너지와 소모되는 에너지를 고려하여 데이터를 병합, 압축하여 전송함으로써 싱크노드에 도달하는 데이터양을 증가시키기 위한 기법을 제안한다. 본 기법에서 노드는 데이터 압축 효율을 높이기 위해 센싱 데이터를 병합해 두고, 잔여 에너지를 예측하여 예측된 에너지양이 배터리의 총량을 넘어설 것이라고 판단되면, 수집된 에너지가 낭비되지 않도록 이를 이용하여 병합된 데이터를 압축 후 전송하고, 반대로 에너지 고갈이 예상되면 절전 모드로 동작하여 송수신기를 끄고 데이터의 센싱만 수행한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 에너지 수집기반 무선 센서 네트워크, 데이터 병합과 데이터 압축에 관련된 기존 연구들을 소개하고, 3장에서 제안하는 기법인 에너지 적응형 데이터 병합 및 압축 기법을 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통한 제안된 기법의 성능 측정 결과를 보여주고, 5장에서 결론으로 마무리한다.

II. Related Work

1. Energy-harvesting WSNs

일반적으로 무선 센서 노드는 유한한 용량의 배터리로 동작하기 때문에 노드의 수명이 제한적이다. 이 제한된 수명을 극복하기 위해 에너지 수집형 센서 노드를 사용한 기법들이 제안되었고, 이를 이용하여 주변에서 수집되는 에너지를 효율적으로 사용하는 방법에 대한 연구가 진행되었다[4]. 에너지 수집기반 센서 노드는 주변 환경으로부터 에너지를 수집하기 때문에 센서 노드의 지속성이 보장된다. 그 중에서도 태양 에너지는 주기성과 지속성이 보장되면서 다른 수집 에너지 자원에 비해 전력 밀도도 높기 때문에 일반적인 센서 노드의 에너지 요구량을 대부분 만족시킬 수 있다[10-11]. Kansal[12]은 에너지 수집 노드의 에너지 모델과, 노드가 영원히 동작 가능한 에너지의 경계

를 정하는 모델을 소개하였다. [13]에서는 노드의 소모 전력 P_{sys} 과 수집 전력 P_{solar} 를 고려하여 에너지 사용량을 관리하는 기법을 제안했다. [14-17]에서는 에너지원 별로 수집되는 에너지양을 예측할 수 있는 다양한 기법들을 제안했다.

2. Data Aggregation for WSNs

데이터 병합[18]은 무선 센서 네트워크에서 노드의 에너지 소모를 줄일 수 있는 방법 중 하나이다. 데이터를 병합함으로써 중계노드는 일정 데이터양 혹은 일정 기간 동안 데이터를 모은 뒤 이웃 노드에게 전달하기 때문에 일반적인 전송에 비해 전송 횟수를 줄일 수 있다. 또한 데이터를 병합하는 과정에서 중복되거나 불필요한 데이터를 제거하여 이웃 노드에게 전송할 데이터 크기를 줄임으로써 전송에 소모되는 에너지를 줄일 수 있다 [19].

이러한 데이터 병합 기법중 하나로 클러스터를 사용한 기법이 있다. 이 클러스터링 기법에서 센서 노드는 자신이 속해있는 클러스터의 헤드에게 데이터를 전달한다. 여러 센서 노드들로부터 데이터를 전달받은 클러스터 헤드는 받은 데이터를 취합한 뒤, 직접 싱크노드에 전송하거나, 다른 클러스터 헤드를 통해 싱크노드에 전달한다. 이러한 특성을 기반으로 클러스터 구성 및 클러스터 기반의 데이터 병합 기법이 연구되어왔다. Heinzelman[20]은 데이터의 신뢰성을 높이기 위한 클러스터링 기법인 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 기법을 제안하였다. 이 기법은 클러스터 헤드를 공평하게 교체함으로써 균형 있는 에너지 소모를 할 수 있게 했다. Chatterjea[21]는 클러스터링과 Directed Diffusion 기법을 결합하여 네트워크의 효율성을 향상시키는 데이터 병합 기법을 소개하였다. [22]에서는 전체 네트워크의 데이터를 획득하지 않고, 몇몇 노드들로부터만 데이터를 얻은 뒤 원하는 데이터를 추정하는 Gossip알고리즘을 이용한 방법을 소개했다.

3. Data Compression for WSNs

데이터 압축은 중계 노드의 에너지 소모를 감소시킬 수 있는 또 다른 방법 중 하나이다. 일반적인 컴퓨터 시스템에서 사용되고 있는 전형적인 데이터 압축 알고리즘은 압축을 수행할 때 연산에 사용되는 하드웨어 제약이 크기 때문에 하드웨어 성능이 제한적인 센서 노드에는 적합하지 않다. 그래서 이를 극복하기 위한 낮은 오버헤드의 압축 기법들이 연구되었다[23-25]. 이러한 연구들은 압축 알고리즘을 무선 센서 네트워크의 특성에 맞게 경량화 하였고, 이로 인해 센서 노드에서 저전력으로 압축 알고리즘을 수행하는 것이 가능해졌다. 그 결과, 데이터 크기의 감소로 인해 송수신에 필요한 에너지도 감소하게 된다.

[25]에서 소개한 Sensor Lempel-Ziv-Welch(S-LZW)는 무선 센서 네트워크에서 많이 쓰이는 대표적인 무손실 압축 기법 중 하나로서, 사전 기반 알고리즘이다. S-LZW는 기존의 LZW 압축 알고리즘을 무선 센서 네트워크 환경에 맞게 경량화하여 재설계되었기 때문에, 압축률이 높은 반면에 압축에 드는

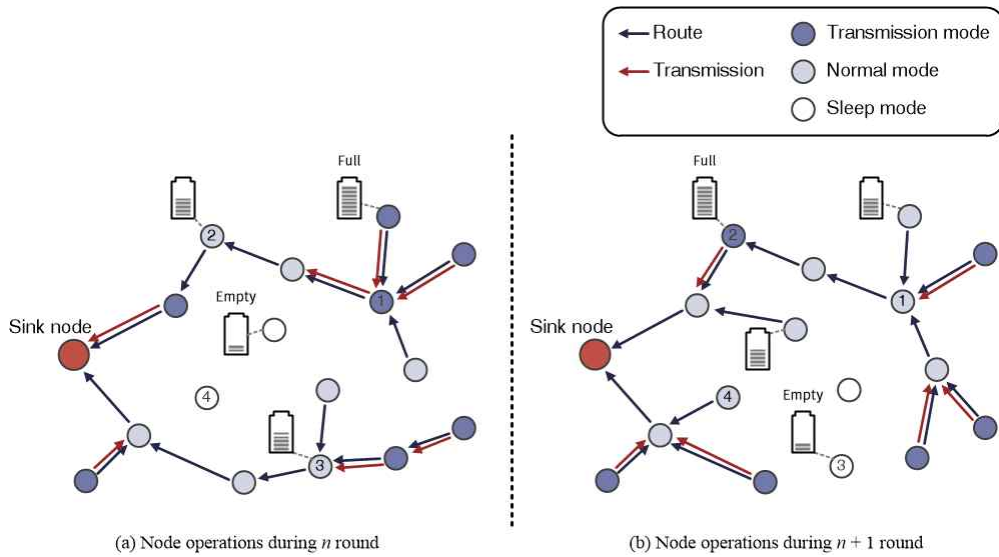


Fig. 1. Overview of adaptive data aggregation and compression scheme

에너지가 크지 않아 널리 쓰이고 있다. [23]에서는 라우팅시 전달되는 통신 구조와 통신 제어정보의 내용을 압축하여 전송 에너지 소모를 줄이는 Data Funneling 기법을 제안하였다. 이 기법에서는 무손실 압축 방식인 coding by ordering 기법으로 데이터를 압축하여 전송함으로써 전송 소모 에너지를 줄였다. [26]에서는 태양 에너지 수집형 무선 센서 네트워크에서 전송 지연시간을 줄이기 위해 남은 에너지를 활용하는 압축 기법을 제안하였다. [24]는 전송되는 데이터를 중계 노드에서 압축하여 전달하는 in-network 압축 기법인 PINCO를 제안했다. 이 기법에서 중계노드는 이전 노드에서 압축된 데이터를 받으면 이를 압축 해제하지 않고, 재압축하여 다음 노드에 전달함으로써 압축 해제에 대한 오버헤드를 줄이고, 데이터양을 감소시킴으로써 전송 소모 에너지를 줄이는 것을 연구하였다.

III. Adaptive Data Aggregation and Compression Scheme for WSNs

본 논문에서 제안하는 기법은 에너지 수집형 센서 노드를 사용한 무선 센서 네트워크에서, 센싱된 데이터를 병합하고 노드의 예측 잔여 에너지 레벨에 따라 데이터의 압축과 전송 시점을 결정하여 싱크 노드에서의 데이터의 수집량을 증가시키는 기법을 제안한다. 이 기법은 지연이 허용된 네트워크(delay tolerant network)에서 주기적으로 정보를 수집하는 무선 센서 네트워크 환경을 위해 고안되었다.

제안하는 기법에서 노드는 이웃 노드로부터 전달받은 데이터와 자신이 수집한 데이터를 병합하는 동작을 수행한다. 일정 주기마다 다음 주기의 잔여 에너지양을 예측하고, 그 값이 배터리 총량을 넘어서 수집된 에너지가 낭비될 수 있다고 판단되면, 이를 이용하여 병합된 데이터를 압축하여 전송한다. 반면,

노드의 에너지 고갈이 예상될 경우에는 송수신기를 끄고 절전 모드로 전환한다. 이와 같이 예상 잔여 에너지 레벨에 따라 병합된 데이터를 압축하여 전송함으로써 중계 노드의 정전 시간을 줄이고, 싱크 노드의 데이터 수집량을 증가시킬 수 있다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 에너지 적응형 데이터 병합 및 압축 기법을 개략적으로 보여준다.

1. Node Operations

센서 노드는 주변으로부터 일정 주기로 데이터를 수집한 후 병합고, 이를 압축하여 전송한다. 이 때, 각 노드는 다음 주기의 남은 에너지를 예측하여 노드의 동작 모드를 결정하고, 그에 따라 라우팅을 다시 수행한다. 즉, 그림 1 (a)와 같이 동작하던 노드들은 다음 주기에 그림 1 (b)와 같이 에너지 상태에 따라 자신의 모습을 선택하고, 그에 따라 전송 경로를 다시 설정한다. 본 논문에서는 앞에서 언급한 바와 같이 데이터를 수집하고 잔여 에너지양을 예측한 후 노드의 동작 모드 결정을 하는 주기를 한 라운드로 표현하였다.

각각의 센서 노드는 예측되는 잔여 에너지양에 따라 다음과 같이 3가지 모드를 선택하여 동작한다. 노드의 동작 모드는 다음과 같다.

- 기본 모드 : 센서 노드의 일반적인 동작으로, 예상되는 노드에 저장 용량을 초과하는 여분의 에너지가 없을 것이라고 판단될 때, 노드는 압축의 효율을 높이기 위하여 주변 노드로부터 받은 데이터와 자신의 데이터를 병합한다. 그림 1 (a)에서 3번 노드는 이러한 기본 모드의 노드를 나타내고 있다. 이 노드는 주변의 전송 모드인 노드로부터 데이터를 받고 있지만, 이를 전송하지 않고 비축하는 것을 알 수 있다.
- 전송 모드 : 수집되는 에너지로 인하여 잔여 에너지양이 배

터리 용량을 초과 할 것이라고 판단되면, 초과된 에너지를 사용하여 지금까지 병합된 데이터를 압축한 후 전송한다. 단, 이웃 노드로부터 이미 압축 후 전달받은 데이터는 다시 압축하지 않는다. 그림 1 (a)의 1번 노드는 전송 모드로 동작하는 것을 보여주고 있다. 이 노드는 에너지가 충분하기 때문에, 주변 노드로부터 받은 데이터를 라우팅 경로에 따라 전송하고 있다.

• 절전 모드 동작 : 노드의 배터리 고갈이 예상되면 송수신기를 끄고 절전 모드로 전환한다. 절전 모드로 전환된 노드는 현재 주기에서 데이터 송수신을 하지 않으므로, 라우팅 패킷을 받지 않으므로써 자동으로 라우팅에서 제외된다. 단, 절전 모드 상태이더라도 데이터 유실을 막기 위해 데이터 센싱을 계속 진행한다. 그림 1 (a)의 4번 노드는 절전 모드로 동작하는 것을 보여준다. 이 노드는 에너지가 부족하기 때문에, 라우팅에서 제외되었고, 그 결과, 주변 노드로부터 아무런 데이터도 받지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 이 노드도 센싱을 수행하며 데이터를 비축한다.

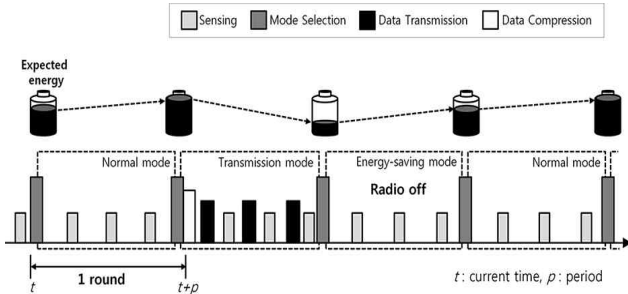


Fig. 2. Periodic sensor node operations

만약 센서 노드의 저장 공간이 부족한 상황이 발생하면, 배터리 잔량에 관계없이 데이터를 전송한다. 반면, 절전 모드 상태에 있는 노드가 데이터 센싱 중에 저장 용량을 초과할 경우 이전에 센싱된 데이터는 폐기한다.

그림 2는 잔여 에너지양에 따른 노드의 동작과 모드 변화의 예를 보여준다. 그림 2의 노드는 ① t시간에 일반 모드를 선택하여 p시간(1 round)동안 데이터를 모으는 동작을 수행한다. ② p시간 경과 후, 노드는 다시 모드를 선택하는데, 이 때, 에너지가 넘칠 것으로 예상되기 때문에 노드는 전송 모드를 선택한다. 전송 모드의 노드는 데이터 수집과 함께, 지금까지 병합된 데이터를 다음 노드로 전송한다. ③ t+2p 시간까지 전송으로 많은 에너지를 소모한 노드는 더 이상 전송시, 정전이 예상됐기 때문에 이 노드는 절전 모드를 선택하여 모든 전송을 중단하고 에너지를 비축한다. 이 때, 절전 모드인 노드도 센싱을 수행함으로써 자신의 데이터를 비축한다.

2. Residual Energy Prediction

우리가 제안하는 기법은 노드의 잔여 에너지양을 예측하여 노드의 동작 모드를 결정한다. 그러므로 우선 노드의 잔여 에너

지양을 예측해야 한다.

노드의 예상 잔여 에너지양은 노드의 현재 잔여 에너지, 전송 소모 에너지, 압축 소모 에너지 등을 고려하여 예측할 수 있다. 현재 시각이 t일 때, 주기 p 이후의 예상 잔여 에너지양 $E'_{remain}(t,p)$ 는

$$E'_{remain}(t,p) = E_{remain}(t) - E'_{rx}(t,p) - E'_{tx}(t,p) - E'_{comp}(t,p) - E'_{sys}(t,p) + E'_{charge}(t,p) \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있다[27]. 위 식 (1)에서 $E_{remain}(t)$ 는 시각 t때의 잔여 에너지양, $E'_{rx}(t,p)$ 는 t시각부터 p동안의 예상 데이터 수신 에너지, $E'_{tx}(t,p)$ 는 예상 데이터 송신 에너지, $E'_{comp}(t,p)$ 는 병합된 데이터를 압축하는 데 소비되는 에너지, $E'_{sys}(t,p)$ 는 데이터 송수신을 제외한 예상 소모 에너지를 나타내고, $E'_{charge}(t,p)$ 는 예상 수집 에너지를 의미한다. $E_{remain}(t)$ 는 노드에서 측정할 수 있고, $E'_{rx}(t,p)$ 과 $E'_{sys}(t,p)$ 는 노드마다 소모량이 정해져 있다. $E'_{charge}(t,p)$ 는 기존의 여러 수집에너지 예측 기법을 통해 예측할 수 있다 [27-28]. 따라서 노드의 예상 남은 에너지를 예측하기 위해서는 $E'_{tx}(t,p)$ 를 추가로 알 수 있어야 한다.

전송 에너지 E_{tx} 는 [29]에서 제안된 전송 에너지 소모 모델에 의해 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E_{tx} = S\beta d^\alpha \quad (2)$$

여기서 S는 데이터 크기, β 는 비트 당 전송 에너지, d는 전송거리, α 는 경로손실을 나타낸다. 노드가 이웃 노드로 데이터를 전송할 때 자신이 수집한 데이터와 다른 노드로부터 전달받은 데이터를 병합한 후 압축하여 보내기 때문에 전송해야 하는 데이터양을 수집한 데이터양 S_{sense} , 이웃 노드로부터 받은 데이터양 S_{aggr} , 압축률 R_{comp} 로 나타내면 $S_{sense}/R_{comp} + S_{aggr}$ 가 된다. 이를 위의 식 (2)에 대입하여 예상 데이터 전송 에너지 $E'_{tx}(t,p)$ 를 구하면

$$E'_{tx}(t,p) = \left(\frac{S_{sense}}{R_{comp}} + S_{aggr} \right) \beta d^\alpha \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다.

한편, 식 (1)에서, 만약 기본 모드로 동작하는 경우(데이터 송신 하지 않음)라면 $E'_{tx}(t,p)$ 는 0이 된다. 따라서 기본 모드에서의 예상 잔여 에너지양 $E'^{rx}_{remain}(t,p)$ 는 다음과 같다.

$$E'^{rx}_{remain}(t,p) = E_{remain}(t) - E'_{rx}(t,p) - E'_{sys}(t,p) + E'_{charge}(t,p) \quad (4)$$

한편, 에너지 부족으로 인해 절전 모드로 동작하는 노드는 데이터 송수신을 하지 않으므로 식 (1)의 $E'_{rx}(t,p)$ 과 $E'_{tx}(t,p)$ 는 모두 0이 될 것이고, 이를 다시 표현하면

$$E'_{\text{remain}}{}^{\text{noomm}}(t,p) = E_{\text{remain}}(t) - E'_{\text{sys}}(t,p) + E'_{\text{charge}}(t,p) \quad (5)$$

가 된다.

노드는 각 모드별로 위 식 (1), (4), (5)를 이용하여 현재 노드의 동작 상태에 따른 잔여 에너지를 예측할 수 있다.

3. Operating Mode Determination

제안하는 기법에서 노드의 동작 모드를 결정하기 위해서는 위의 예상된 노드의 잔여에너지를 이용하여 적절한 모드를 선택해야 한다. 현재 시간이 t 일 때, 기본 모드로 동작하는 노드의 p 시간 이후 예상 에너지 잔량 $E'_{\text{remain}}{}^{\text{rx}}(t,p)$ 이 배터리 용량 C 보다 크면 수집되는 에너지가 낭비될 수 있기 때문에 이를 이용하여 데이터를 압축한 후 전송한다. 즉, 아래의 수식

$$E'_{\text{remain}}{}^{\text{rx}}(t,p) > C \quad (6)$$

를 만족한다면, 전송 모드를 선택한다. 반대로, 에너지가 고갈 될 것으로 예상될 경우, 에너지 소모를 최소화하기 위해서 절전 모드로 전환한다. 즉,

$$E'_{\text{remain}}{}^{\text{rx}}(t,p) < E_{\text{min}} \quad (7)$$

를 만족할 경우, 노드는 절전 모드를 선택한다.

전송 모드로 동작하는 노드의 예상 잔여 에너지 $E'_{\text{remain}}(t,p)$ 이 배터리 용량 C 보다 작을 경우, 데이터 전송을 위한 여분의 에너지가 없는 것이기 때문에, 현재까지 모인 데이터를 모두 전송하고, 데이터의 병합과 압축 효율을 높이기 위해 기본 모드로 전환하여 데이터 전송을 중단하고 데이터를 비축한다. 즉, 다음의 수식

$$E'_{\text{remain}}(t,p) < C \quad (8)$$

를 만족할 경우, 노드는 다시 기본 모드를 선택한다.

절전 모드인 노드는 데이터 송수신을 중단하고 에너지를 비축하다가 데이터를 전송받을 수 있는 에너지가 모이면 기본 모드로 전환한다. 즉,

$$E'_{\text{remain}}{}^{\text{rx}}(t,p) > E_{\text{min}} \quad (9)$$

을 만족시키면 다른 노드로부터 데이터를 수신할 정도의 잔여 에너지가 있을 것으로 예상되기 때문에, 다시 기본 모드로 전환하고 메시지를 수신하게 된다.

이와 같이 본 기법에서는 노드의 잔여 에너지량을 예측하여 노드의 동작 모드를 결정한다. Algorithm 1는 본 논문에서 제안하는 노드의 동작을 의사 코드로 나타내었다.

Algorithm 1. Mode Selection

```

1: Require: Execute every  $p$ 
2: if  $m = \text{NORMAL\_MODE}$  then
3:   Calculate  $E'_{\text{remain}}{}^{\text{rx}}(i,p)$  in (4)
4:   if  $E'_{\text{remain}}{}^{\text{rx}}(i,p) > C$  then
5:      $m \leftarrow \text{TRANSMISSION\_MODE}$ 
6:     Compress and send the aggregated data
7:   else if  $E'_{\text{remain}}{}^{\text{rx}}(i,p) < E_{\text{min}}$  then
8:      $m \leftarrow \text{ENERGY\_SAVING\_MODE}$ 
9:     Turn off radio transceiver
10:    Aggregate sensed data only
11:   end if
12: else if  $m = \text{TRANSMISSION\_MODE}$  then
13:   Calculate  $E'_{\text{remain}}(i,p)$  in (1)
14:   if  $E'_{\text{remain}}(i,p) < C$  then
15:     Transmit all data
16:      $m \leftarrow \text{NORMAL\_MODE}$ 
17:     Aggregate sensed and received data
18:   end if
19: else if  $m = \text{ENERGY\_SAVING\_MODE}$  then
20:   Calculate  $E'_{\text{remain}}{}^{\text{rx}}(i,p)$  in (4)
21:   if  $E'_{\text{remain}}{}^{\text{rx}}(i,p) > E_{\text{min}}$  then
22:      $m \leftarrow \text{NORMAL\_MODE}$ 
23:     Turn on radio transceiver
24:     Aggregate sensed and received data
25:   end if
26: end if
27: end if

```

IV. Performance Evaluation

제안하는 기법의 성능평가를 위해 시뮬레이션을 통해 정전 노드 수와 데이터 수집량을 측정하였다. 이 측정된 결과를 바탕으로 제안하는 기법을 데이터 병합 및 압축을 하지 않은 방식과 5,000 bytes, 7,000 bytes, 9,000 bytes만큼 각각 모은 데이터를 압축하여 전송하는 방식과 비교하였다.

1. Simulation Enviroments

제안하는 기법의 성능평가를 위해 SolarCastalia[30]를 이용하였으며, 60 m × 60 m 필드에서 50 ~ 300개의 에너지 수집 노드를 랜덤으로 배치하였다. 데이터 전송 모듈은 CC2420을 사용했다. 이는 10 ~ 20 m의 전송 거리를 가지고 250 kbps의 전송 속도를 낼 수 있다. 데이터 전송을 위한 라우팅은 MDT(Minimum Depth Tree) 기법을 사용하였다. 시뮬레이션은 1라운드를 600초로 하여 500라운드동안 진행하였다. 표 1은 실험에 사용된 주요 인자들을 나타낸 것이다.

Table 1. Experimental environments

| Parameters | Values |
|----------------------------|-------------|
| Number of nodes | 50 - 300 |
| Node topology | Random |
| Size of topology | 60 m x 60 m |
| Routing | MDT |
| Radio range | 10 - 20 m |
| Duty cycle | 0.1 ms |
| Sensing period | 20 s |
| Transmission period | 5 min |
| The amount of sensing data | 128 bytes |
| Rounds | 500 |

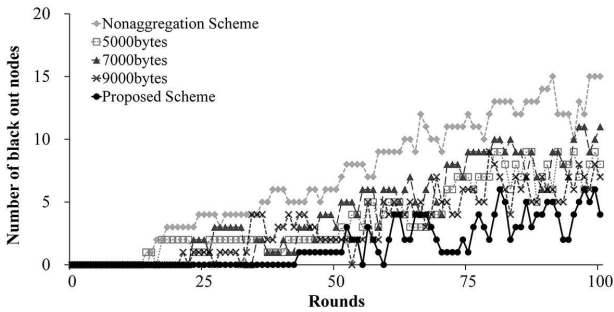


Fig. 3. Change in the number of blackout nodes

2. Number of Blackout Nodes

그림 3은 시간에 따른 정전 노드 수를 각 기법별로 비교한 것이다. 여기서 제안하는 기법이 다른 기법들에 비하여 정전 노드 수가 가장 적은 상태를 유지하는 것을 알 수 있다. 이는 제안된 기법이 노드의 에너지 상태에 적응적으로 동작하여 에너지 고갈을 효과적으로 예방했다는 것을 보여준다.

그림 4은 노드 수 변화에 따른 정전 노드 수를 각 기법별로 비교하여 나타낸 결과이다. 실험 결과에서 제안하는 기법은 노드 수에 상관없이 다른 기법들에 비하여 정전 노드 수가 적은 것을 확인 할 수 있다. 특히, 노드 수가 50개 일 때 제안된 기법은 압축과 병합을 하지 않은 기법에 비해 약 74% 만큼의 정전 노드 수가 감소하였으며, 5,000, 7000, 9,000 bytes만큼 모은 데이터를 압축하여 전송하는 기법에 비해 각각 약 66%, 63%, 60%로 감소했음을 알 수 있다. 이를 통해, 노드 수가 증가하여도 제안 기법에서 가장 적은 정전 노드 수가 발생함을 알 수 있

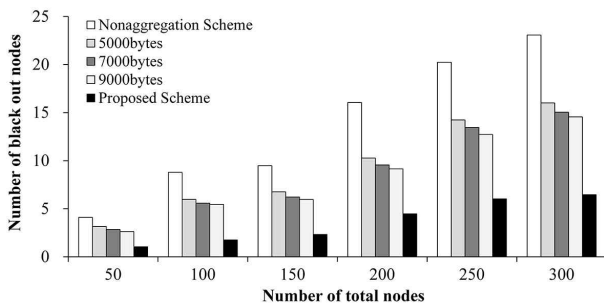


Fig. 4. Number of blackout nodes

는데, 이는 본 논문에서 제안하는 기법의 확장성을 보여준다.

3. Amount of Gathered Data

그림 5는 200개의 노드가 배치된 환경에서 시간에 따른 센서 노드의 센싱된 데이터양을 나타낸 결과이다. 여기서, 제안된 기법이 다른 기법들보다 센싱된 데이터양이 더 많은 것으로 나타나는데, 이는 앞에서 살펴본 바와 같이 노드가 에너지 변화에 적응적으로 대응함으로써 정전상태에 빠지는 것을 막았기 때문에, 더 많은 데이터를 센싱한 것을 알 수 있다.

그림 6는 200개 노드가 배치된 시뮬레이션 환경에서 시간에 따른 싱크 노드의 데이터 수집량 변화를 나타낸 것이다. 여기서, 제안 기법은 노드의 잔여 에너지를 미리 예측한 결과에 따라 현재 동작 모드를 결정하여 동작하였기 때문에, 노드 동작의 극적인 변화 없이 비슷한 추이를 보이고 있다. 각 라운드 마다 수집된 데이터는 다른 기법에 비해 적지만, 안정적으로 데이터를 수집하여 다른 기법들에 비해 데이터 수집량이 많은 것을 확인할 수 있었다.

그림 7은 노드 수에 따른 각 기법의 싱크 노드에서의 데이터 수집량을 비교하여 나타낸 것이다. 노드 수가 적을 때에는 제안 기법은 압축과 병합을 하지 않은 기법에 비해 약 14% 정도, 다른 데이터 병합 및 압축 기법에 비해 각각 약 2 ~ 5%정도 증가한 것을 알 수 있다. 하지만 노드 수가 많아질수록 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 다른 기법들이 노드 수 변화에 대응하지 못한 반면, 제안된 기법은 에너지 상태에 따라 동작 모드를 변경함으로써 이에 효과적으로 대처한 것으로 생각할 수 있다.

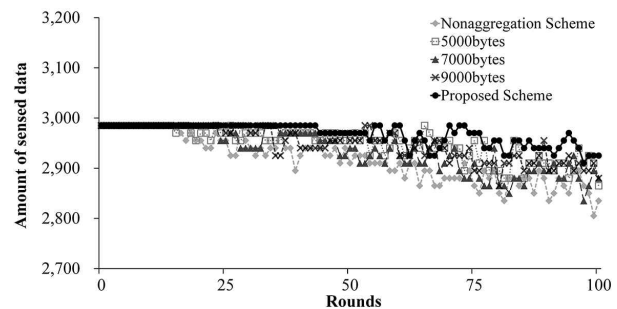


Fig. 5. Change in the amount of data sensed

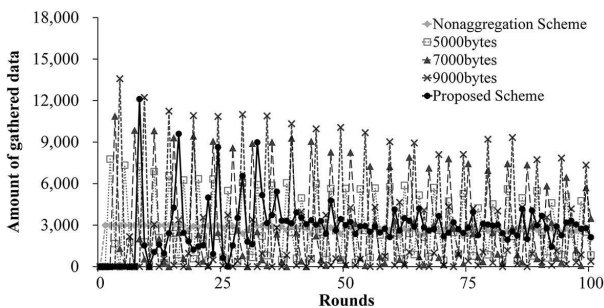


Fig. 6. Change in the amount of data arrived at the sink node

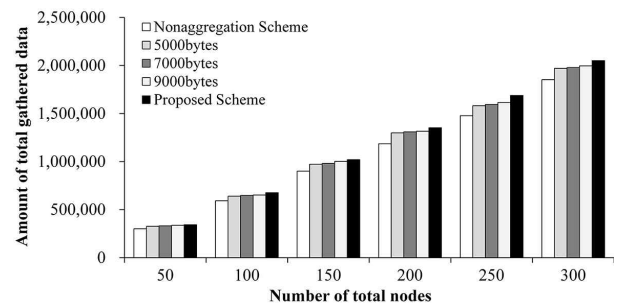


Fig. 7. Amount of gathered data at the sink node

Table 2. ANOVA result of the number of blackout nodes and the amount of data gathered at the sink.

| | Blackout nodes | Gathered data |
|-----|----------------|---------------|
| 50 | 4E-49 | 7.83E-33 |
| 100 | 5.92E-52 | 8.07E-43 |
| 150 | 1.25E-44 | 8.16E-46 |
| 200 | 3.5E-54 | 1.03E-41 |
| 250 | 1.23E-51 | 3.53E-43 |
| 300 | 6.1E-54 | 2.92E-37 |

우리는 위의 실험 결과들을 검증하기 위해 제안된 기법과 다른 기법들 간의 ANOVA를 실시했다. 표 2는 그림 4와 그림 7에서 보여준 결과에 대한 ANOVA 테스트의 유의확률(p-value)을 보여준다. 테스트 결과, 모든 유의확률은 0.05이하로, 실험 결과 값이 유의미하다는 것을 보여준다.

V. Conclusions

본 논문에서는 에너지 수집기반 무선 센서 네트워크 환경에서 수집되는 에너지를 데이터 병합과 압축에 효율적으로 소비하여 데이터 수집량을 증가시키는 기법을 제안하였다. 제안된 기법에서 노드는 자신의 잔여 에너지량을 예측하여 데이터의 압축과 전송 시기를 조절함으로써 압축 효율을 높이고 중계노드의 부하를 감소시킨다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법이 다른 기법들에 비해 정전 노드 수가 적고, 그 결과 싱크 노드에 전달된 데이터양이 증가한 것을 알 수 있었다. 한편 제안된 기법은 센싱된 데이터양 증가에 비해 싱크 노드에서 수집된 데이터양의 증가가 적은데, 이는 다른 기법에 비해 동작 노드의 수가 많기 때문에 이들이 전달하는 데이터가 중계노드에 부하를 주기 때문인 것으로 판단됐다. 다음 연구에서는 중계노드의 부하를 더욱 분산시키는 기법을 적용함으로써 더욱 효율적인 알고리즘을 고안할 수 있을 것으로 기대한다.

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] K. W. Lee and C. Seong, "Implementation of Sensor Network Monitoring System with Energy Efficiency Constraints," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 13, No. 1, pp. 10-16, January 2010.
- [4] S. Kim, S. Choi, and Y. Cho, "Clustering Algorithm for Extending Lifetime of Wireless Sensor Networks," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, Vol. 20, No. 4, pp. 77-85, April 2015.
- [5] J. Shin, J. Kim, and S. Kim, "An Energy Efficient Data Delivery Scheme based on Cross-Layer Design in Wireless Sensor Networks," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, Vol. 13, No. 4, pp. 177-184, July 2008.
- [6] I. Cho, H. Lee, and K. Lee, "A scheme of EEMR protocol for energy efficient in wireless sensor networks," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, Vol. 10, No. 4, pp. 229-237, September 2005.
- [7] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 13, No. 3, pp. 443-461, July 2011.
- [8] E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer and M. Zorzi, "In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 14, No. 2, pp. 70-87, April 2007.
- [9] Y. Nie, S. Liu, Z. Chen and X. Qi, "An Adaptive State-Aware Routing Algorithm for Data Aggregation in Wireless Sensor Networks," *Journal of Communications*, Vol. 8, No. 5, May 2013.
- [10] S. Roundy, D. Steingart, L. Frechette, P. Wright, J. Rabaey, "Power sources for wireless sensor networks," *Wireless sensor networks*, pp. 1-17, January 2004.
- [11] I. Stojmenovic, "Handbook of sensor networks: Algorithms and architectures," Wiley, pp. 75-100, 2005.
- [12] A. Kansal, D. Potter, M. B. Srivastava, "Performance aware tasking for environmentally powered sensor networks," *Proceedings of the 9th Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, pp. 223-234, June 2004.
- [13] Y. Yang, L. Wang, D. Noh, H. K. Le, T. F. Abdelzaher, "Solarstore: enhancing data reliability in solar-powered storagecentric sensor networks," *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp. 333-346, June 2009.
- [14] 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.
- [15] J. R. Piorno, C. Bergonzini, D. Atienza, and T. S. Rosing, "Prediction and management in energy harvested wireless sensor nodes," *1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*, pp. 6-10, May 2009.
- [16] C. Moser, L. Thiele, D. Brunelli, and L. Benini, "Adaptive power management in energy harvesting systems,"

- Proceedings of the Conference on Design, automation and test in Europe, pp. 773-778, April 2007.
- [17] A. Cammarano, C. Petrioli, and D. Spenza, "Pro-energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks," 9th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, pp. 75-83, October 2012.
- [18] R. Rajagopalan and P. K. Varshney, "Data aggregation techniques in sensor networks: A survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 8, No. 4, pp. 48-63, Fourth Quarter 2006.
- [19] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker, "The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks," 22nd International Conference on Distributed Computing Systems, pp. 575-78, July 2002.
- [20] W. R. Heinzelman, "Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks," Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 2000.
- [21] S. Chatterjea and P. Havinga, "A Dynamic Data Aggregation Scheme For Wireless Sensor Networks," 14th Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing, November 2003.
- [22] S. Boyd, A. Ghosh, B. Prabhakar, and D. Shah, "Gossip algorithms: Design, analysis and applications," IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Vol. 3, pp. 1653-1664, March 2005.
- [23] D. Petrovic, R. C. Shah, K. Ramchandran, and J. Rabaey, "Data funneling: Routing with aggregation and compression for wireless sensor networks," The First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, pp. 156-162, May 2003.
- [24] T. Arici, B. Gedik, Y. Altunbasak, and L. Liu, "Pinco: A pipelined in-network compression scheme for data collection in wireless sensor networks," The 12th International Conference on Computer Communications and Networks, pp. 539-544, October 2003.
- [25] C. M. Sadler and M. Martonosi, "Data compression algorithms for energy constrained devices in delay tolerant networks," The 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 265-278, November 2006.
- [26] M. Kang, S. Jeong and D. Noh, "Energy-aware Selective Compression Scheme for Solar Energy based Wireless Sensor Networks," ACM Conference on Research in Adaptive and Convergent Systems, pp. 231-236, October 2015.
- [27] D. Noh, Y. Yong, L. Wang, H. K. Le and T. Abdelzaher, "Minimum Variance Energy Allocation for a Solar-Powered Sensor System," LNCS (IEEE/ACM DCoSS'09), Vol. 5516, pp. 44-57, June 2009.
- [28] A. Cammarano, C. Petrioli and D. Spenza, "Pro- Energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks," IEEE 9th International Conference on In Mobile Adhoc and Sensor Systems, pp. 75-83, October 2012.
- [29] T. Melodia, D. Pompili and I. Akyildiz, "Optimal local topology knowledge for energy efficient geographical routing in sensor networks," 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, pp. 1705-1716, March 2004.
- [30] 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



Semi Jeong received the B.S. degree in Electric Engineering from Soongsil University, Korea, in 2015. She is currently a M.S. student in Department of Software Convergence at Soongsil University.

Her research interests include cyber physical system, embedded system software, and ubiquitous sensor network.



Hyeok Kim received the B.S. degree 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 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 associate professor in Department of Software Convergence at Soongsil University.

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



Ilkjun 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.