

Sensing and Compression Rate Selection with Energy-Allocation in Solar-Powered Wireless Sensor Networks

Ikjune Yoon*

Abstract

Solar-powered wireless sensor nodes can use extra energy to obtain additional data to increase the precision. However, if the amount of data sensed is increased indiscriminately, the overhead of relay nodes may increase, and their energy may be exhausted. In this paper, we introduce a sensing and compression rate selection scheme to increase the amount of data obtained while preventing energy exhaustion. In this scheme, the neighbor nodes of the sink node determine the limit of data to be transmitted according to the allocated energy and their descendant nodes, and the other nodes select a compression algorithm appropriate to the allocated energy and the limitation of data to be transmitted. A simulation result verifies that the proposed scheme gathers more data with a lower number of blackout nodes than other schemes. We also found that it adapts better to changes in node density and the amount of energy harvested.

▶ Keyword: Wireless sensor network, Solar-powered, Sensing rate, Compression, Energy allocation

I. Introduction

무선 센서 네트워크(WSN, Wireless sensor network)에서 사용되는 노드는 일반적으로 배터리로 동작하기 때문에, 유한한 수명을 가지고 있고, 이를 극복하기 위한 연구들이 활발히 진행되어왔다[1,2]. 노드의 수명을 극복하기 위한 방법으로, 주변 환경으로부터 에너지를 모으는 에너지 수집 노드를 이용하는 기법들이 제안되었다[4-6]. 특히, 태양 에너지는 다른 에너지원에 비해 높은 전력 밀도(약 $15\text{mW}/\text{cm}^2$)로 인해 더욱 각광받고 있다[6]. 하지만 이 에너지 수집 노드조차도 수집되는 에너지보다 많은 에너지를 소모할 경우, 에너지가 고갈되어 정전 상태가 될 수 있다. 반면, 수집되는 에너지를 충분히 활용하지 못하면, 보관할 수 있는 양 이상의 에너지가 수집되어 버려질 수 있다. 따라서 소모 에너지의 양을 수집되는 양에 따라 조절함으로써 노드가 영원히 사는 범위 내에서 최대한 에너지를 활용하는 기법이 필요하다[7,8].

노드의 에너지 소모를 조절하는 기법 중, 시간에 따라 사용

할 수 있는 에너지양을 제한하는 에너지 할당 기법[9,10]은 에너지 수집량 변화에 관계없이 고르게 활용하는데 효과적이다. 특히, 태양 에너지는 낮에만 수집되고 밤에는 수집되지 않기 때문에 시간에 따른 편차가 크지만, 이 기법들을 이용하면 시간에 관계없이 대체로 일정한 에너지를 사용할 수 있기 때문에, 일정한 주기로 환경을 관찰해야 하는 응용에 유용하다.

WSN에서는 일반적으로 멀티홉으로 데이터를 전송한다. 그 결과, 싱크 노드에 가까운 노드일수록 전송해야하는 데이터양이 증가하는 핫스팟 문제[11]를 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 데이터를 압축하여 전송하는 기법들이 연구되어 왔다[12]. 데이터를 압축해서 전송할 경우, 데이터 압축에 적지 않은 에너지를 소모하지만, 전송해야하는 데이터 크기가 줄어들기 때문에 중계노드가 전달해야하는 데이터양을 감소시켜 에너지 소모를 줄일 수 있다. 반면, 싱크 노드에서 가까운 노드의 경우, 데이터를 압축해도 전달하는 중계 노드의 수가 적기 때문에

• First Author: Ikjune Yoon. Corresponding Author: Ikjune Yoon

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

• Received: 2017. 05. 10, Revised: 2017. 05. 21, Accepted: 2017. 05. 22.

비효율적일 수 있다. 따라서 데이터 압축은 데이터 수집 노드와 중계 노드의 에너지 효율을 고려하여 적용해야 한다.

본 논문에서는 태양 에너지 수집 WSN에서 앞에서 언급된 노드의 효율적인 에너지 관리 문제와 핫스팟 문제를 해결하고, 데이터 획득량을 증가시키기 위한 데이터 수집량과 압축 알고리즘 선택 기법을 제안한다. 제안된 기법에서, 노드는 수집되는 에너지 사용량을 시간별로 할당하고, 이 할당된 에너지 범위 내에서 전송할 수 있는 데이터의 한계를 결정한다. 이 제한된 전송량 내에서 더 많은 데이터를 수집하기 위해서는 제한된 양보다 초과된 데이터를 수집한 후 이를 압축하여 제한된 용량에 맞춰 전송해야 한다. 따라서 노드는 전송 가능 데이터양, 할당된 에너지와 소모되는 에너지를 고려하여 압축 알고리즘을 선택하고, 이를 이용하여 추가로 수집된 데이터의 양을 제한된 전송량에 맞게 압축해서 전송함으로써 싱크 노드가 전달받는 데이터의 양을 증가시킨다.

II. Related Work

1. Energy management in Solar-powered WSNs

에너지 수집 WSN에서는 수집되는 에너지를 최대한 활용하면서 노드가 죽지 않게 하는 기법들이 연구되어 왔다. 특히 [7]에서는 에너지 수집 노드의 에너지 모델과, 이 노드가 영원히 살 수 있게 하는 에너지의 경계를 정하는 모델을 제시했다. [8]에서는 에너지 수집률과 소모율을 기반으로 데이터 획득 신뢰도를 높이기 위한 에너지 모델을 제안했다. 수집되는 에너지를 효율적으로 사용하기 위해서는 수집되는 에너지를 예측하고 그에 따라 에너지 사용계획을 수립해야 한다. [14]에서는 이동 평균 기법을 이용하여 수집되는 에너지를 예측했고, [14]에서는 과거 데이터의 가중치 합계를 이용했다. [15]는 매일의 날씨 상황에 따라 변화하는 에너지를 예측하는 기법을 제안했고, [16]는 날씨와 시간에 따라 장, 단기 예측을 통해 보다 정확하게 예측하는 기법을 제안했다. [9,10]에서는 시간대별로 수집

편차가 큰 태양 에너지를 시간에 관계없이 일정하게 사용하기 위한 에너지 할당 기법을 제시했다.

2. Data compression in WSNs

무선 센서 노드는 초소형의 내장형 시스템으로 구현되어 처리 속도가 느리고, 가용 메모리가 적다. 기존에 사용되던 압축 기법들은 이러한 제한된 환경에 적합하지 않기 때문에 무선 센서 노드에서 사용 가능한 경량 압축 기법이 필요하다[12].

[17]에서는 사전 기반의 비손실 압축 기법인 LZW(Sensor Lempel-Ziv-Welch)[18]을 센서 노드에서 동작할 수 있도록 경량화한 기법인 S-LZW(Sensor LZW) 기법과, 수집된 데이터에 가역변환인 BWT(Burrows-Wheeler Transform)[19]를 수행한 뒤, S-LZW를 수행하여 압축률을 높이는 방식인 S-LZW-BWT(Sensor LZW with Burrows Wheeler Transform) 기법을 제안했다. 이 기법들은 WSN의 데이터를 효과적으로 압축할 수 있게 설계되어있기 때문에 각광받는 압축 기법이다. [20]에서는 엔트로피 기반의 무손실 압축 알고리즘을 제안했다. 이는 사진이나 영상 압축 코덱과 같이 각 데이터의 차분값을 이용한 방법이다.

본 논문에서 제안하는 기법은 에너지의 효율적인 관리를 위해 2.1장에서 제시된 에너지 할당 기법을 적용하였고, 선택할 수 있는 압축 기법으로는 위에서 언급된 S-LZW와 S-LZW-BWT 알고리즘을 적용했다.

III. Sensing and Compression Rate Selection

본 논문에서는 태양 에너지를 이용한 에너지 수집 WSN에서, 수집되는 데이터양을 증가시키기 위한 데이터 수집량 조절과 압축 알고리즘 선택 기법을 제안한다. 이 기법은 주변 환경을 모니터링하기 위해, 주기적으로 센싱 데이터를 싱크 노드에 전달하는 WSN를 기반으로 고안되었다. 그림 1은 제안된 기법

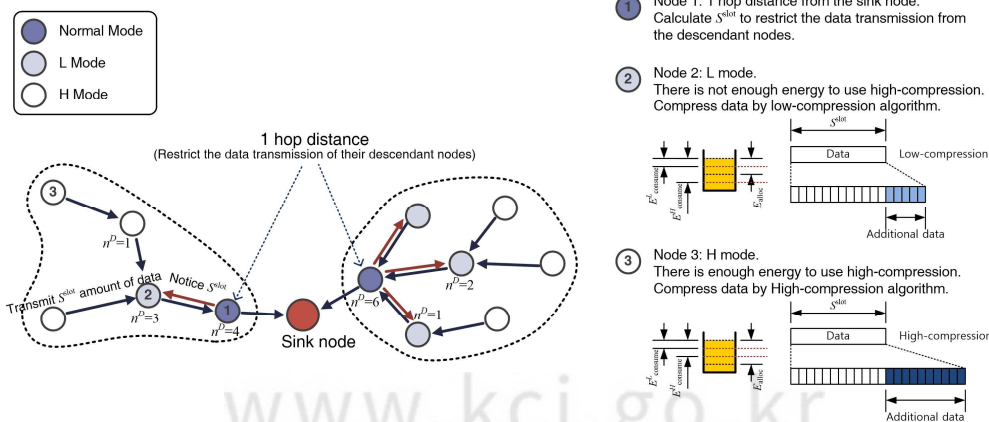


Fig.1. Overview of the proposed scheme.

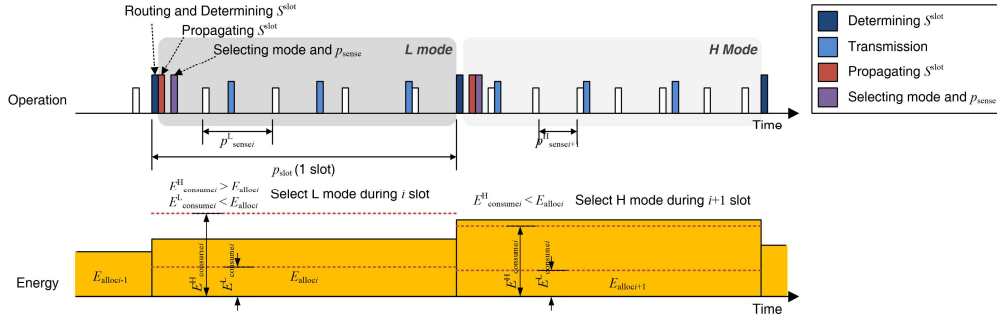


Fig. 2. Operation of a node over time during two slots.

을 개략적으로 보여준다.

1. Node operations

제한된 기법에서 각 노드는 수집되는 태양 에너지를 시간에 관계없이 고르게 사용하기 위해, 하루를 N 개의 슬롯으로 나누고, 각 슬롯에 사용할 수 있는 에너지를 할당한다. 이를 위해, 본 기법에서는 [9]에서 제안된 에너지 할당 기법을 적용했다.

각 슬롯에 사용할 수 있는 에너지 e_{alloc} 가 결정되면, 싱크 노드에서 1홉 거리에 있는 노드들은 현재 슬롯동안 자신과 자신의 자손 노드들이 전송할 수 있는 데이터양 s^{slot} 을 계산하고, 이를 자손 노드들에게 전송하고, 이를 받은 노드들은 그 슬롯동안, 해당 양 만큼의 데이터만 전송한다. 이때, 노드는 e_{alloc} 를 고려하여, 자신의 동작 모드를 결정하고, 해당 모드에서 사용하는 압축 알고리즘을 이용하여 데이터를 압축하는데, 압축된 데이터의 크기가 s^{slot} 가 되게 수집량을 조절하여, 제한된 범위 안에서 최대한 많은 데이터를 전송하도록 한다. 그림 2는 시간에 따른 노드의 동작을 보여준다.

2. Transmission amount determination

노드들은 멀티홉 전송을 하기 때문에 일반적으로 싱크 노드에서 1홉 거리에 있는 노드가 그에게 데이터를 전달하는 다른 노드에 비해 데이터 전송량이 많다[11]. 이 때, 바깥쪽 노드가 데이터를 많이 수집하여 전송할 경우, 그로부터 싱크 노드까지의 경로에 있는 모든 노드들은 에너지를 더 소모하게 한다. 따라서 우리는 1 홉 거리의 노드가 자신의 가용 데이터양을 계산하고 이를 자신에게 데이터를 전송하는 노드들에게 알려, 노드의 전송량을 제한하는 기법을 사용한다. 이를 위해 먼저 한 노드가 전송할 수 있는 데이터의 양을 예측해야 한다.

슬롯 i 에 한 노드가 p_{sense_i} 주기로 한번에 s_{sense} 만큼의 데이터를 수집한다고 할 때, 이 슬롯동안 전송해야 하는 데이터 양 s_i^{slot} 는

$$s_i^{slot} = \frac{p_{slot}}{p_{sense_i}} s_{sense} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 p_{slot} 는 한 슬롯의 길이이다. 이를

전송하기 위해 패킷화 했을 때, 한 번에 전송할 수 있는 최대 데이터 크기는 s_{trans}^{max} 이고, 패킷에 추가되는 헤더와 푸터의 크기는 s_{head} 라고 하면, 패킷의 크기는

$$f^{pack}(s_i^{slot}) = s_i^{slot} + \lceil \frac{s_i^{slot}}{s_{trans}^{max}} \rceil s_{head} \quad (2)$$

의 s^{slot} 에 관한 함수로 나타낼 수 있다. 이 노드의 자손 노드가 n_i^D 개 있고, 모든 노드가 공평하게 데이터를 전송할 경우, 이 슬롯동안 전송해야 하는, 릴레이 데이터를 포함한, 데이터의 총량은

$$s_{total_i}^{packet} = f^{pack}(s_i^{slot})(1 + n_i^D) \quad (3)$$

가 된다.

한편, 슬롯 i 에 할당된 에너지양이 e_{alloc_i} 일 때, 이 슬롯동안 데이터 전송에 사용할 수 있는 에너지 e_{trans_i} 는

$$e_{trans_i} = e_{alloc_i} - e_{elec} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 e_{elec} 는 이 슬롯동안의 전송 에너지를 제외한 기본 소모 에너지이다. e_{trans_i} 로 전송할 수 있는 데이터양을 구하기 위해 본 논문에서는 [22]에서 제안된 다음의 에너지 모델을 이용한다.

$$e = s\beta d^\alpha \quad (5)$$

여기서 s 는 전송 데이터의 크기, β 는 데이터 1바이트를 1m 전송하기 위한 단위 에너지, d 는 전송거리, α 는 경로 손실을 나타낸다. 이를 이용하여 한 슬롯동안 전송할 수 있는 패킷의 총량 $s_{total_i}^{packet}$ 를 계산하면

$$s_{total_i}^{packet} = \frac{e_{trans_i}}{\beta d^\alpha} \quad (6)$$

가 된다. 위의 식 (6)에 식 (3)를 대입하여 정리하면 이 노드와 자손 노드가 슬롯 i 동안 전송할 수 있는 실제 데이터양 s_i^{slot} 를 구할 수 있다. 이 노드는 이를 슬롯 i 시작 시, 자손 노드에게 전송하여, 모든 자손 노드가 슬롯 i 동안 해당 데이터양 만큼의 데이터만을 전송할 수 있게 한다.

3. Mode selection

노드들은 i 슬롯에 앞에서 결정된 데이터양 s_i^{slot} 만큼만 전송할 수 있기 때문에, 할당된 에너지가 남을 경우, 추가 데이터를 수집하고 이를 압축함으로써, s_i^{slot} 를 초과하지 않는 범위 내에서 최대한 많은 데이터를 수집할 수 있게 한다. 여기서는 다음과 같은 세 가지 모드를 이용하여 데이터 수집량과 압축 기법을 결정한다.

- 일반 모드: 할당된 에너지가 데이터를 추가 수집하여 압축할 만큼 충분하지 않을 때, 노드는 데이터를 압축하지 않고 수집된 데이터를 그대로 전송하는 일반 모드로 동작한다. 일반 모드에서는 데이터를 압축하지 않기 때문에, 슬롯 i 동안 s_i^{slot} 만큼의 데이터를 수집하여 그대로 전송한다. 한편, 싱크 노드로부터 1홉 거리에 있는 노드들은 에너지 소모가 가장 크고, 데이터를 압축하여 전송하더라도 중계 노드의 에너지를 절약할 수 없기 때문에, 언제나 일반 모드로 동작한다.

- L 모드: 할당된 에너지가 데이터를 압축해서 전달할 만큼 충분할 경우, 노드는 추가 데이터를 수집하고, 이를 압축하여 전송하는 L 모드로 동작한다. 이 모드의 노드는 압축된 데이터의 크기가 s_i^{slot} 가 될 수 있도록 추가 데이터를 수집하고, 이를 압축하여 전송한다. 그 결과, 데이터를 추가로 수집하고 압축하기 위한 에너지가 더 소모된다. 이 모드에서 우리는 S-LZW[17] 알고리즘을 이용하여 데이터를 압축한다.

- H 모드: 할당된 에너지가 데이터를 압축해서 전송하고도 많은 에너지가 남을 경우, 노드는 L 모드보다 더 많은 데이터를 수집하고, 이를 압축률이 좋지만, 에너지를 많이 소모하는 압축 기법을 이용하여 압축한 후 전송하는 H 모드로 동작한다. 이 모드의 노드 역시 압축된 데이터의 크기가 s_i^{slot} 가 될 수 있도록 추가 데이터를 수집하고, 이를 압축률이 더 좋은 알고리즘으로 압축하여 전송한다. 그 결과, L 모드에 비해 데이터를 더 수집하고 압축에 더 많은 에너지를 소모한다. 이 모드에서 우리는 S-LZW-BWT[17] 알고리즘을 이용하여 데이터를 압축한다.

노드는 각 슬롯마다 자신의 부모 노드로부터 s_i^{slot} 를 전달받으면, 슬롯에 할당된 에너지 e_{alloc_i} 를 초과하지 않는 범위 내에서 최대한 많은 데이터를 전송할 수 있는 모드를 선택해야 한다. 이를 위해, 노드는 슬롯 i 동안 각 모드에서 소모되는 에너지를 계산해야 한다.

슬롯 i 동안 노드의 소모 에너지는 [22]에서 제안된 에너지 모델에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{\text{consume}_i} = e_{\text{trans}_i} + e_{\text{elec}} + e_{\text{comp}_i} \quad (7)$$

여기서 e_{comp_i} 는 i 슬롯동안 데이터를 압축하는데 소모되는

에너지이다. 노드는 i 슬롯동안 s_i^{slot} 만큼 데이터를 전송하기 때문에 i 슬롯 동안 소모되는 전송 에너지 e_{trans_i} 는 식 (3)과 (6)에 의해

$$e_{\text{trans}_i} = s_{\text{total}_i}^{\text{packet}} \beta d^\alpha = f^{\text{pack}}(s_i^{\text{slot}})(1 + n_i^D) \beta d^\alpha \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다.

노드가 데이터를 압축해서 전송할 경우, 압축된 데이터의 크기가 s_i^{slot} 이고, s byte를 압축할 때 소모되는 에너지가 $e_{\text{comp}}(s)$ 일 때, 압축하기 전의 데이터 크기 s_i^{raw} 는 $s_i^{\text{slot}} R$ 이기 때문에, 슬롯 i 동안 노드의 소모 에너지는

$$e_{\text{consume}_i} = e_{\text{trans}_i} + e_{\text{elec}} + e_{\text{comp}}(s_i^{\text{raw}} R) \quad (9)$$

가 된다. 여기서, R 는 압축률이고, $R = \frac{\text{Uncompressed size}}{\text{Compressed size}}$ 로 나타낸다. 위의 식 (9)를 이용하여 H 모드의 소모에너지 $e_{\text{consume}_i}^H$ 와 L모드에서의 소모 에너지 $e_{\text{consume}_i}^L$ 를 각각 구하면

$$e_{\text{consume}_i}^H = e_{\text{trans}_i} + e_{\text{elec}} + e_{\text{comp}}^H(s_i^{\text{raw}} R^H) \quad (10)$$

$$e_{\text{consume}_i}^L = e_{\text{trans}_i} + e_{\text{elec}} + e_{\text{comp}}^L(s_i^{\text{raw}} R^L) \quad (11)$$

가 된다. 여기서 e_{comp}^H 과 e_{comp}^L 는 각각 H 모드와 L 모드에서 사용된 압축 기법의 소모 에너지, R^H 과 R^L 는 각각 H 모드와 L 모드에서 사용된 압축 기법의 압축률을 나타낸다. 위의 각 모드에서 소모되는 예상 에너지가 슬롯 i 에 할당된 에너지보다 적을 경우, 해당 모드로 동작하는데 충분한 에너지가 확보된 것을 의미하기 때문에 노드는 그에 맞는 모드를 선택해야 한다. 즉,

$$e_{\text{consume}_i}^H < e_{\text{alloc}_i} \quad (12)$$

가 만족될 경우, H 모드로 동작하기에 충분한 에너지가 있을 것으로 예상되기 때문에 노드는 H 모드를 선택한다.

만약 H 모드를 선택할 충분한 에너지가 없고,

$$e_{\text{consume}_i}^L < e_{\text{alloc}_i} \quad (13)$$

를 만족한다면, H 모드로 동작하기엔 부족하지만 L 모드로 동작하기에 충분한 에너지가 할당된 것을 의미하기 때문에 노드는 L모드를 선택한다. 위의 두 식 (12)과 (13)를 만족하지 않을 경우, 노드는 압축에 소모할 충분한 에너지가 없기 때문에 일반 모드로 동작한다.

4. Determining sensing period

노드는 모드 결정 후, 그 모드에서 s_i^{slot} byte의 데이터를 전송하기 위한 적합한 센싱 주기를 결정해야 한다. 1슬롯 동안 s byte를 수집하기 위한 센싱 주기 p_{sense} 는

$$p_{\text{sense}}(s) = \frac{s_{\text{sense}}}{s} p_{\text{slot}} \quad (14)$$

의 함수로 나타낼 수 있다. 슬롯 i 동안 노드의 센싱 데이터가 s_i^{slot} bytes 만큼 전송되어야 하기 때문에, H와 L 모드일 때의 노드가 수집해야 하는 압축하기 전의 데이터 크기는 각각 $s_i^{\text{slot}} R^H$, $s_i^{\text{slot}} R^L$ 가 된다. 따라서 H 모드, L 모드, 일반 모드에서의 s_i^{slot} byte의 데이터를 전송하기 위한 데이터 수집 주기 $p_{\text{sense}}^H(s_i^{\text{slot}})$, $p_{\text{sense}}^L(s_i^{\text{slot}})$, $p_{\text{sense}}(s_i^{\text{slot}})$ 는

$$p_{\text{sense}}^H(s_i^{\text{slot}}) = \frac{s_{\text{sense}}}{s_i^{\text{slot}} R^H} p_{\text{slot}} \quad (15)$$

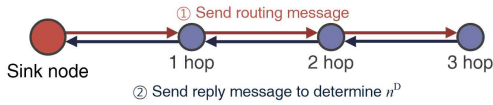
$$p_{\text{sense}}^L(s_i^{\text{slot}}) = \frac{s_{\text{sense}}}{s_i^{\text{slot}} R^L} p_{\text{slot}} \quad (16)$$

$$p_{\text{sense}}(s_i^{\text{slot}}) = \frac{s_{\text{sense}}}{s_i^{\text{slot}}} p_{\text{slot}} \quad (17)$$

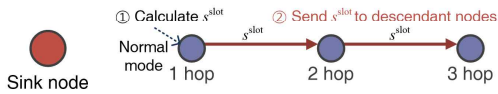
로 나타낼 수 있다.

이와 같이, 제안된 기법에서 각 노드는 1홉 노드로부터 슬롯 i 동안의 데이터 전송량 s_i^{slot} 을 전달받고, 할당된 에너지 내에서 최대한 효율이 좋은 모드를 선택한다. 그 후 s_i^{slot} 를 만족시키는 양의 데이터를 수집하고 압축하여 전송함으로써, 중계 노드에 전혀 부담을 주지 않으면서 에너지 효율을 높일 수 있다. 그림 3은 위의 과정을 단계적으로 보여준다.

1. Routing & Determining descendant nodes



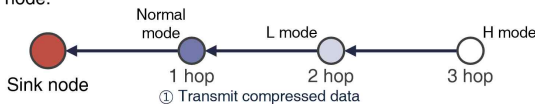
2. 1 hop distance nodes calculate their own s_i^{slot} with Equation (3)-(6) and propagate it to their descendant nodes



3. Nodes that receives s_i^{slot} determines their modes and p_{sense} by calculating Equation (12), (13), (15)-(17).



4. Nodes sense every p_{sense} and, compress and transmit the data toward the sink node.



5. Repeat 1-5 every p_{slot}

Fig. 3. Mode and sensing period determination

IV. Performance Evaluation

1. Simulation Environments

우리는 제안된 기법의 성능을 평가하기 위하여 SolarCastalia[23]를 이용하여 시뮬레이션을 수행했다. 성능 비교를 위해 제안된 기법(Proposed)과 다른 네 가지 기법, 1) 압축하지 않고 전송하는 기본 기법(Naive), 2) S-LZW 압축 알고리즘 만으로 압축해서 전송하는 기법(S-LZW), 3) S-LZW-BWT 압축 알고리즘 만으로 압축해서 전송하는 기법(S-LZW-BWT), 4) 선택적 압축 기법 (A-COMP)[21]의 총 5 가지 기법의 정전 노드 수, 센싱된 데이터양, 싱크 노드에 도달한 데이터양을 측정했다. 시뮬레이션을 위해 200개의 에너지 수집 노드를 정해진 밀도에 맞게 무작위로 배치했고, 수집되는 에너지는 [23]에서 측정된 시간에 따른 태양 에너지 변화량을 이용했다. 모든 시뮬레이션은 30번 측정된 결과의 평균을 구했다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 주요 인자들을 보여준다.

Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Number of nodes	200
Node topology	Random
Routing algorithm	MDT
Transmission Range	10 m
Battery capacity	100 J
p_{slot}	1 h
p_{sense}	10-60 s
$s_{\text{trans}}^{\text{max}}$	102 bytes
s_{head}	31 bytes
s_{sense}	64 bytes
α	4
β	8-10 J

2. Simulation results

그림 4는 각 기법들의 시간에 따른 정전 노드의 수를 1000 슬롯부터 1168슬롯까지, 총 7일간 측정된 결과이다. 제안된 기법외의 다른 기법들은 태양 에너지 수집량의 변화에 따라 정전 노드의 수가 변하고 있지만, 이에 비해 제안된 기법은 정전 노드가 거의 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 데이터 전송량을 제한함으로써 중계 노드의 부담이 줄었기 때문인 것으로 판단된다.

그림 5는 싱크 노드로부터의 홉 수별 정전 노드 수를 2000 슬롯에 측정된 결과를 보여준다. 모든 기법에서 핫스팟 문제로 인해 싱크 노드로부터 1홉 거리의 노드들이 정전되는 수가 가장 많은 것을 알 수 있다. 제안된 기법은 그림 4에서와 같이 정전 노드가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

그림 6과 7은 각각 시간에 따른 전체 노드의 센싱 데이터양과 이 데이터가 싱크 노드에 도달한 수를 측정된 결과를 보여준다. 그림 6에서, 센싱된 데이터의 양은 제안된 기법과

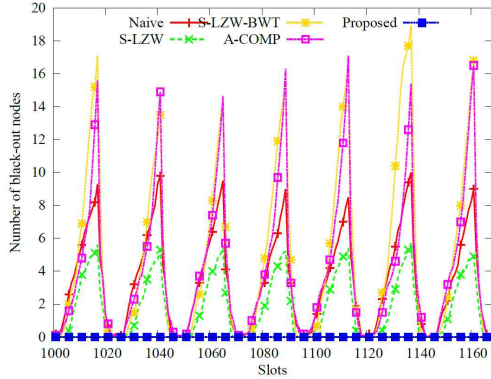


Fig. 4. Change in the number of black-out nodes

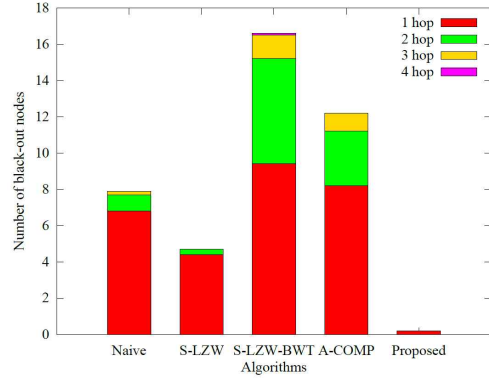


Fig. 5. Comparison of the number of black-out nodes according to hops

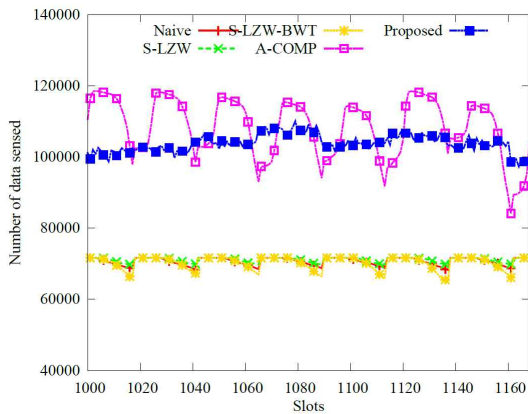


Fig. 6. Change in the number of data sensed

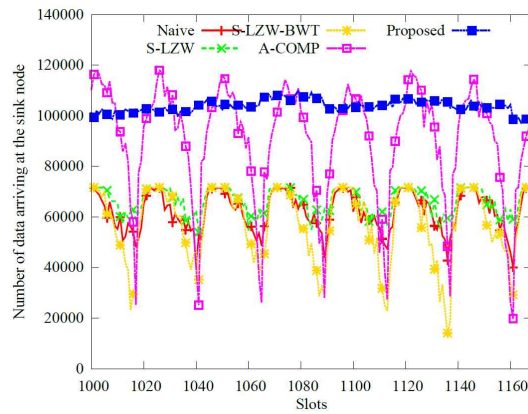


Fig. 7. Change in the number of data arriving at the sink node

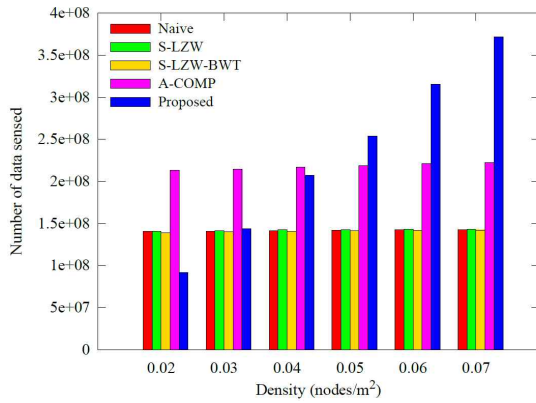


Fig. 8. Change in the number of data sensed with node density

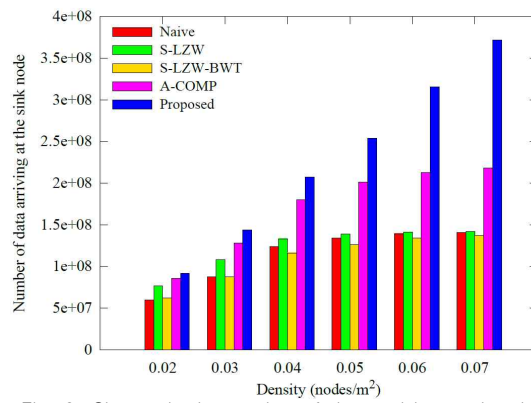


Fig. 9. Change in the number of data arriving at the sink node with node density

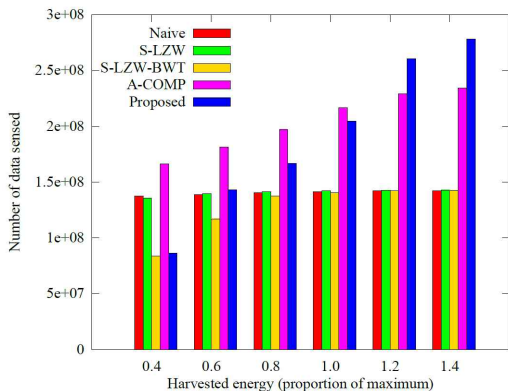


Fig. 10. Comparison of the number of data sensed according to the solar energy

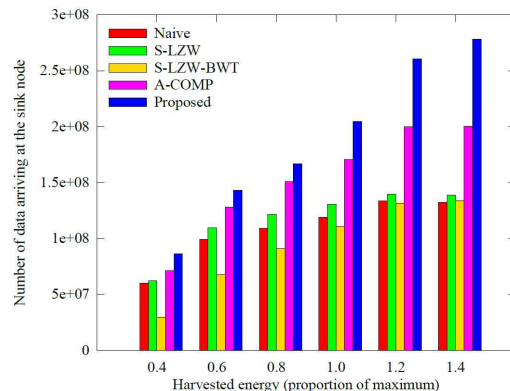


Fig. 11. Comparison of the number of data obtained according to the solar energy

A-COMP 기법이 다른 기법에 비해 높은 것을 알 수 있다. 한편 A-COMP 기법은 그림 4에서와 같이, 수집되는 에너지양에 따라 정전 노드가 발생하기 때문에, 이에 따라 센싱된 데이터의 양이 변화하는 것을 알 수 있다. 반면 제안된 기법은 할당된 에너지에 따라 동적으로 수집되는 양을 결정하기 때문에 센싱된 데이터의 양이 대체로 일정한 것을 알 수 있다. 그림 6은 이 수집된 데이터들이 싱크 노드에 얼마나 도달하는지를 보여주는 데, 다른 기법들은 그림 5에서와 같이 싱크 노드에서 가까운 노드들의 에너지가 고갈되어 다른 노드의 데이터를 전달하지 못했기 때문에, 많은 양의 센싱 데이터가 싱크 노드에 도달하지 못한 것을 알 수 있다. 반면 제안된 기법은 정전 노드가 거의 발생하지 않았기 때문에 센싱된 데이터가 대부분 싱크노드에 도달했다.

그림 8과 그림 9는 각각 노드의 밀도 변화에 따른 센싱 데이터의 양과 싱크 노드에 도달한 데이터의 수를 나타낸다. 그림 8에서 제안된 기법을 제외한 다른 기법들은 언제나 정해진 양의 데이터를 수집하기 때문에, 밀도의 변화에 관계없이 비슷한 데이터양을 수집하는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 9에서 노드의 밀도가 줄어들면 싱크 노드에 도달하는 데이터 수가 적어지는 것을 알 수 있다. 이는 노드의 밀도가 낮을 경우, 노드들의 전송 경로가 길어지기 때문에 중계노드가 정전 상태가 됐을 때, 더욱 많은 데이터가 전송 중 소실되기 때문이다. 반면, 제안된 기법은 1홉 노드에서 n_i^D 에 따라 데이터 전송량을 결정하기 때문에 밀도가 낮아 전송 경로가 길어질 경우, 데이터를 적게 수집하고, 밀도가 높아져 전송 경로가 짧아질 경우 데이터를 많이 수집하는 것을 알 수 있다. 또한 전송 데이터양을 조절하여 정전 노드의 발생을 억제했기 때문에, 수집된 데이터가 대부분 싱크 노드에 도달한 것을 알 수 있다.

그림 8과 9는 각각 태양 에너지의 변화에 따른 센싱 데이터의 양과 싱크 노드에 도달한 데이터의 수를 나타낸다. 태양 에너지가 적을수록 제안된 기법의 센싱 데이터양은 줄어들게 된다. 이는 할당된 에너지가 태양 에너지의 양에 따라 변화하기 때문이다. 이 때, 다른 기법들의 센싱 데이터양은 제안된 기법보다 많게 되지만, 태양 에너지의 양이 적기 때문에 정전 노드가 많이 발생하여, 싱크 노드에 도달하는 데이터의 양은 제안된 기법보다 적어지게 된다. 태양 에너지가 많을 때, 제안된 기법은 할당된 에너지가 많아지고, 이에 맞게 센싱 주기를 조절하기 때문에 센싱 되는 데이터양과 싱크 노드에 도달하는 데이터양이 다른 기법에 비해 커지게 된다.

V. Conclusions

본 논문에서는 태양 에너지를 수집하는 WSN를 이용하여 주기적으로 데이터를 수집할 때, 센싱 주기와 압축 기법을 선택함

으로써 데이터의 수집량을 늘리는 기법을 소개했다. 이 기법에서 싱크 노드로부터 1홉 거리의 노드는 데이터 전송 한계를 결정하고 이를 다른 노드에 전달함으로써 전송 데이터양을 제한하고, 다른 노드들은 이에 맞는 센싱 주기와 압축 기법을 선택함으로써 정전 노드의 발생을 억제하고, 데이터 수집량을 증가시킨다. 시뮬레이션 결과, 제안된 기법은 상황에 따라 데이터 수집 주기와 압축 기법을 선택함으로써 다른 기법에 비해 정전 노드의 발생을 효과적으로 억제하고, 더 많은 양의 데이터를 얻을 수 있는 것을 알 수 있었다. 한편, 제안된 기법은 현재 평면 형태로 배치된 네트워크에만 적용이 가능하도록 설계되어 있기 때문에, 클러스터나 레이어 구조의 네트워크에는 사용할 수 없다. 향후에 이를 다양한 구조의 네트워크에 적용하는 방법이 고안되어야 할 것이다.

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] S. C. Kim, S. K. Choi, and Y. H. 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.
- [3] H. Yoo, M. Shim, and D. Kim, "Dynamic duty-cycle scheduling schemes for energy-harvesting wireless sensor networks," *IEEE communications letters*, vol. 16, no. 2, pp. 202-204, March 2012.
- [4] R. J. Vullers, R. Van Schaijk, H. J. Visser, J. Penders, and C. Van Hoof, "Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks," *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 29-38, June 2010.
- [5] S. Basagni, M. Y. Naderi, C. Petrioli, and D. Spenza, "Wireless sensor networks with energy harvesting," *Mobile Ad Hoc Networking: The Cutting Edge Directions*, pp. 701-736, March 2013.
- [6] S. J. Roundy, "Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion," Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, 2003.
- [7] A. Kansal, D. Potter, and M. B. Srivastava, "Performance aware tasking for environmentally powered sensor networks," *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 32, no. 1, pp. 223-234, June 2004.
- [8] Y. Yang, L. Wang, D. K. Noh, H. K. Le, and T. F. Abdelzaker, "Solarstore: enhancing data reliability in solar-powered storage-centric sensor networks," *Proceedings of the*

- 7th international conference on Mobile systems, applications, and services. ACM, pp. 333-346, Kraków, Poland, June 22-25, 2002.
- [9] D. K. Noh and K. Kang, "Balanced energy allocation scheme for a solar-powered sensor system and its effects on network-wide performance," *Journal of Computer and System Sciences*, vol. 77, no. 5, pp. 917-932, September 2011.
- [10] Y. Zhang, S. He, and J. Chen, "Data gathering optimization by dynamic sensing and routing in rechargeable sensor networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, no. 3, pp. 1632-1646, June 2016.
- [11] T. Olivares, P. Tirado, L. Orozco-Barbosa, V. Lopez, and P. Pedron, "Simulation of power-aware wireless sensor network architectures," *Proceedings of the ACM international workshop on Performance monitoring, measurement, and evaluation of heterogeneous wireless and wired networks*. ACM, pp. 32-39, Terromolinos, Spain, Oct 2, 2006.
- [12] N. Kimura and S. Lati, "A survey on data compression in wireless sensor networks," *International Conference on Information Technology: Coding and Computing*, IEEE, vol. 2, pp. 8-13, Las Vegas, NV, April 4-6, 2005.
- [13] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava, "Power management in energy harvesting sensor networks," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, vol. 6, no. 4, p. 32, September 2007.
- [14] 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*. EDA Consortium, pp. 773-778, Nice, France, April 16-20, 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*, IEEE, pp. 6-10, Aalborg, Denmark, May 17-20, 2009.
- [16] A. Cammarano, C. Petrioli, and D. Spensa, "Pro-energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks," in *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2012 IEEE 9th International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 75-83, Las Vegas, NV, Oct 8-11, 2012.
- [17] C. M. Sadler and M. Martonosi, "Data compression algorithms for energy-constrained devices in delay tolerant networks," *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM, pp. 265-278, Boulder, Colorado, Oct 31-Nov 3, 2006.
- [18] T. A. Welch, "A technique for high-performance data compression," *Computer*, vol. 6, no. 17, pp. 8-19, 1984.
- [19] M. Burrows and D. J. Wheeler, "A block-sorting lossless data compression algorithm," vol. Technical report 124, 1994.
- [20] F. Marcelloni and M. Vecchio, "A simple algorithm for data compression in wireless sensor networks," *Communications Letters, IEEE*, vol. 12, no. 6, pp. 411-413, June 2008.
- [21] I. Yoon, J. M. Yi, S. Jeong, J. Jeon, and D. K. Noh, "Dynamic Sensing-Rate Control Scheme Using a Selective Data-Compression for Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks," *Journal of Embedded Systems and Applications*, vol. 11, no. 2, pp. 79-86, April 2016.
- [22] T. Melodia, D. Pompili, and I. F. Akyildiz, "Optimal local topology knowledge for energy efficient geographical routing in sensor networks," *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, IEEE*, vol. 3, pp. 1705-1716, Hong Kong, China, March 7-11 2004.
- [23] J. M. Yi, M. J. Kang, and D. K. Noh, "Solarcastalia: solar energy harvesting wireless sensor network simulator," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 6, pp. 1-10, January 2015.

Authors



Ilkjune 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.