

논문 2016-11-28

# 에너지 수집형 무선 센서 네트워크를 위한 에너지 적응형 데이터 압축 및 전송 범위 결정 기법

(Energy-Aware Data Compression and Transmission Range Control Scheme for Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks)

이 준 민, 오 엄 지, 노 동 건, 윤 익 준\*

(Jun Min Yi, Eomji Oh, Dong Kun Noh, Ikjune Yoon)

Abstract : Energy-harvesting nodes in wireless sensor networks(WSNs) can be exhausted due to a heavy workload even though they can harvest energy from their environment. On contrast, they can sometimes fully charged, thus waste the harvested energy due to the limited battery-capacity. In order to utilize the harvested energy efficiently, we introduce a selective data compression and transmission range control scheme for energy-harvesting nodes. In this scheme, if the residual energy of a node is expected to run over the battery capacity, the node spends the surplus energy to exploit the data compression or the transmission range expansion; these operations can reduce the burden of intermediate nodes at the expanse of its own energy. Otherwise, the node performs only basic operations such as sensing or transmitting so as to avoid its blackout time. Simulation result verifies that the proposed scheme gathers more data with fewer number of blackout nodes than other schemes by consuming energy efficiently.

Keywords : Wireless sensor network, Energy-harvesting, Data compression, Transmission range, Black-out time

## 1. 서 론

무선 센서 네트워크는 재난지역, 군사지역, 수중 등과 같이 사람이 접근하기 힘든 지역, 산림, 농경지, 해양 등과 같은 광범위한 지역, 건물 교량 등과 같은 구조물, 의료, 자동차, 생태환경 연구 등 다양한 환경에서 데이터 수집을 위해 사용되고 있다. 기존의 무선 센서 네트워크는 제한된 용량의 배터리를 사용하기 때문에 유한한 수명을 갖는다. 이로 인

해 네트워크를 구성하는 수십에서 수천 개 노드의 배터리를 수동으로 교환하거나 재충전해야 하는 문제가 발생한다. 이처럼 무선 센서 네트워크를 유지 보수하는데 어려움이 발생하여, 이를 극복하기 위해 센서 노드의 소모 에너지를 최소화하기 위한 연구가 많이 진행되어 왔다 [1].

최근에는 제한된 수명을 극복하기 위해 에너지 수집 센서 노드가 개발되었다 [2]. 이 에너지 수집 센서 노드는 주변 환경으로부터 에너지를 수집하여 이론적으로 영원히 동작할 수 있다. 따라서, 기존의 무선 센서 네트워크는 에너지 소모를 줄여 네트워크를 오래 유지하기 위해 에너지 최소화를 목표로 했던 반면, 에너지 수집 기반 무선 센서 네트워크는 수집되는 에너지를 효율적으로 사용하는 것이 중요하다.

무선 센서 네트워크는 다수의 센서 노드로 구성되고, 각각의 노드는 수집한 데이터를 주기적으로 싱크 노드로 전송한다. 모든 노드는 애드혹

\*Corresponding Author (ikjune.yoon@gmail.com)

Received: 24 June 2016, Revised: 11 July 2016,

Accepted: 21 July 2016.

J.M. Yi, E. Oh, D.K. Noh, I. Yoon: Soongsil University

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2016-H8501-16-1008)

(ad-hoc) 방식으로 데이터를 전달하기 때문에 자신의 데이터뿐만 아니라 다른 노드로부터 받은 데이터도 싱크 노드로 전달해야 한다. 이때, 싱크 노드에서 가까운 노드는 멀리 떨어져 있는 노드들에 비해, 다른 노드들로 전달받은 데이터의 양이 많으므로, 전송에 소모되는 에너지가 많아 다른 노드들에 비해 빨리 죽게 된다. 죽은 노드가 발생하게 되면, 그 노드로 데이터를 전달하는 다른 노드의 데이터도 싱크 노드로 전달할 수 없으므로 데이터 손실이 커진다. 또한, 죽은 노드를 대신하는 다른 노드가 기존 노드의 데이터를 대신 전달해야 하므로, 소모 에너지가 급격히 증가하여 노드가 연쇄적으로 정전상태가 되는 문제가 발생하여 네트워크의 수명을 단축시킬 수 있다.

반면, 에너지 수집 기반 무선 센서 네트워크에서는 노드의 에너지가 부족하게 되면 죽는 것이 아니라 동작 가능한 에너지가 수집될 때까지의 정전시간이 발생한다. 하지만 노드의 정전시간으로 인해 다른 노드들에게 작업 부하가 발생하여 다른 노드들에서도 정전시간이 발생하게 된다. 또한, 중계 노드에서 정전시간이 발생할 경우 그 노드에 데이터를 전달하는 다른 노드들의 데이터도 싱크 노드에 전달되지 않기 때문에 데이터 수집률이 급격히 낮아질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 무선 센서 네트워크의 기법들을 적용하기엔 에너지 수집 센서 노드의 특성이 반영되어 있지 않아 에너지 수집형 무선 센서 네트워크에서 적합하지 않다. 따라서 에너지 수집 센서 노드의 특성을 반영하여 노드가 죽지 않는 범위 내에서 중계 노드의 작업을 줄이는 기법이 필요하다.

본 논문에서는 각 노드의 여분의 에너지를 활용하여 데이터를 압축하거나 전송 범위를 조절함으로써, 노드 간의 에너지 불균형을 해소하여 데이터 수집률을 높이는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 여분의 에너지가 발생하면 중계 노드의 예상 에너지 소모량에 따라 데이터를 압축하여 전송하거나, 전송 거리 확대를 이용하여 데이터 전송 경로를 줄여 중계 노드에서 사용하는 에너지를 줄인다. 이는 데이터 압축이나 전송 범위 조절만을 시행했을 때보다 전체 네트워크의 에너지 불균형을 해소하고 노드의 정전시간을 감소시켜, 데이터 수집량을 증가시킨다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무선 센서 네트워크에서 발생하는 에너지 문제를 해결하기 위해 연구된 데이터 압축 기법, 전송 범위 조절, 에너지 수집 기반 무선 센서 네트워크를 소개하고, 3장에서는 제안하는 에너지 적응형 데이터 압축 및

전송 범위 조절 기법을 설명하며, 4장에서 이 기법의 성능을 비교한 결과를 보여주고 마지막 5장에서 논문을 마무리한다.

## II. 관련 연구

무선 센서 네트워크에서는 많은 수의 센서 노드를 광범위한 지역에 무작위로 배치한다. 여기서 사용되는 센서 노드는 값이 싸고 크기가 작아 하드웨어적인 제약(프로세서, 메모리, 배터리 등)이 많이 발생한다. 이를 극복하고 네트워크의 지속성과 안정성을 유지하기 위한 데이터 경량 기법, 전송 에너지 절약 기법과 같은 다양한 연구가 진행되고 있다. 최근에는 센서/네트워크의 자율성과 영속성을 최대한 만족하게 하고자 센서 노드가 주변 에너지들을 자율적으로 수집하는 시스템이 연구되고 있다 [2].

### 1. 무선 센서 네트워크에서 데이터 압축

무선 센서 네트워크에서 소모하는 에너지 비용을 보면 일반적으로 데이터 전송에 많은 에너지를 소모한다. 데이터 전송에 소모되는 에너지는 데이터의 크기와 전송 거리에 따라 값이 바뀌게 되며, 데이터의 크기를 줄여 전송에 소모되는 에너지를 절약할 수 있다. 특히 무선 센서 네트워크에서는 애드혹(ad-hoc) 방식으로 데이터를 전달하기 때문에 데이터의 크기를 줄이면 중계 노드의 일을 줄여 전송 에너지 소모를 줄일 수 있다.

C.M. Sadler [3]은 T.A. Welch [4]가 제안한 비손실 압축 기법인 LZW(Lelempel ziv welch) 알고리즘을 센서 노드에 적용하기 위해 LZW를 경량화한 S-LZW(sensor lempel ziv welch)기법과 수집된 데이터에 가역변환인 BWT(burrows wheeler transform) [5]를 수행 후 S-LZW 알고리즘을 수행하는 S-LZW-BWT (sensor LZW with burrows wheeler transform) 기법을 제안하였다. Yoon [6]은 에너지 수집형 노드의 에너지에 따라 데이터의 수집 빈도를 조절하고 S-LZW와 S-LZW-BWT를 사용하여 수집 데이터의 정밀도를 높이는 에너지 인지 데이터 압축 기법을 제안하였다.

본 논문에서는 앞선 연구와 같이 데이터를 압축하여 전송함으로써, 중계 노드의 작업 부하를 줄이게 된다. 이때, 여분의 에너지를 사용하여 데이터를 압축하기 때문에 기존 노드의 동작에 악영향을 미치지 않으며, 중계 노드에게 압축된 데이터를 전송하여 중계 노드에서 사용하는 에너지를 줄이게 된다.

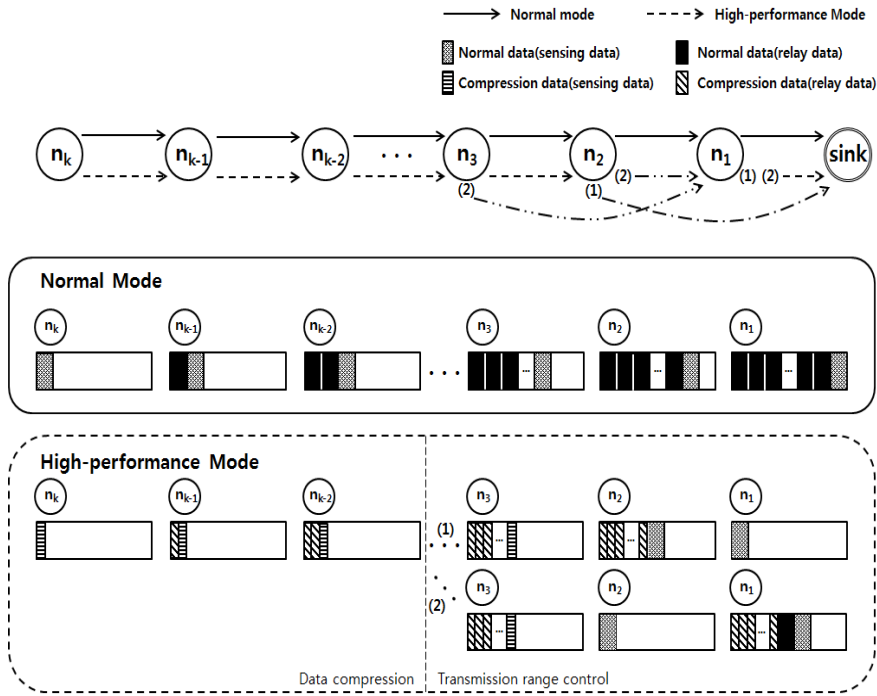


그림 1. 제안 기법의 전체 개요  
Fig. 1 Proposed Scheme Overview

## 2. 에너지 수집형 무선 센서 네트워크

제한된 에너지 문제를 근본적으로 해결하기 위해 에너지 수집 센서 노드가 개발되었다. 에너지 수집 노드는 주변의 다양한 친환경 에너지를 수집하여, 재충전 배터리에 저장 후 시스템에 에너지를 공급한다. 이때 수집 자원과 저장 장치의 특성들로 인해 사용 가능한 에너지량은 변하게 된다.

S. Sudevalayam [2]과 Nico N. Encarnacion [7]은 몇 가지 친환경 에너지 자원의 특성, 수집 방법, 에너지 전환 효율 등을 소개하고, 일반적인 센서 노드의 평균 에너지 소모량을 통해 에너지 수집 센서 노드의 활용 가능성을 연구하였다. 에너지 수집형 무선 센서 네트워크에서 주변 환경으로부터 수집된 에너지는 일반적인 무선 센서 네트워크 응용에서 노드들의 듀티 사이클(duty-cycle)이 0.1~0.2인 것을 감안하면, 아주 고사양의 무선 센서 네트워크 응용을 제외한 일반적인 센서 노드의 파워 요구량을 만족한다. 제안 기법은 선행 연구의 수집 자원에 따라 수집되는 에너지가 일반적인 센서 노드의 평균 에너지 요구량을 만족시키는 것을 고려하여 시스템을 설계하였다.

## III. 에너지 적응형 데이터 압축 및 전송 범위 조절 기법

본 논문에서는 에너지 수집 노드에서 여분의 에너지가 발생할 때, 이를 활용하여 중계 노드의 전송 에너지량을 감소시키기 위한 데이터 압축 및 전송 범위 조절 기법을 제안한다. 이 기법은 에너지 수집 노드가 일정한 주기로 데이터를 수집하고 데이터를 모아 일정한 전송 주기로 전송하는 지연 내성 네트워크(delay tolerant network, DTN) [8]를 대상으로 한다. 이 기법은 데이터 전송 시 중계 노드에서 사용되는 전송 에너지를 감소시키기 위해 데이터 압축 기법과 전송 범위 조절 기법을 사용한다.

데이터 압축 기법은 데이터 압축에 사용되는 에너지가 추가로 발생하지만, 전송되는 데이터 크기를 줄여서 중계 노드의 전송 에너지를 줄일 수 있다. 이는 데이터 전달 경로가 길수록 데이터가 거쳐 가는 노드가 많으므로 더 많은 에너지를 줄일 수 있다.

전송 범위 조절 기법은 전송 거리를 늘리기 위해 더 많은 에너지를 소모하지만, 전송 경로의 홉

## 246 에너지 수집형 무선 센서 네트워크를 위한 에너지 적응형 데이터 압축 및 전송 범위 결정 기법

수를 줄일 수 있기 때문에 중계 노드의 에너지 소모를 줄일 수 있다. 이는 중계 노드의 수를 줄임으로써, 줄어드는 홉 수만큼 전체 에너지 소모를 줄일 수 있다. 그림 1은 제안 기법의 전체적인 개요를 보여 준다.

### 1. 노드의 에너지 모델

제안 기법은 센서 노드에서 소모되는 에너지와 수집되는 에너지양 예측을 통해, 노드의 에너지가 부족할지, 남을지를 알아보고, 에너지가 남을 것으로 예상되는 경우, 각 기법의 중계 노드에서 사용되는 전송 에너지 효율을 비교하여 효율적인 기법을 선택한다. 이때, 남은 에너지양 예측을 위해 [9]에서 제안하는 에너지 모델을 사용한다. 현재 시각이  $t$ 일 때,  $p_{tx}$  후에 노드  $i$ 의 예상 남은 에너지  $E'_{residual_i}(t, p_{tx})$ 는

$$E'_{residual_i}(t, p_{tx}) = E_{residual_i}(t) - E_{consume_i}(t, p_{tx}) + E_{harvest_i}(t, p_{tx}) \quad (1)$$

이다. 여기서  $E_{residual_i}(t)$ 는  $t$ 시간의 노드에 남은 에너지양,  $E_{consume_i}(t, p_{tx})$ 는  $p_{tx}$  시간동안의 소모 에너지양,  $E_{harvest_i}(t, p_{tx})$ 는 수집되는 에너지양을 나타낸다. 위의 소모 에너지  $E_{consume_i}$ 는

$$E_{consume_i} = E_{transmission_i} + E_{system_i} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $E_{transmission_i}$ 는 전송에 소모되는 에너지,  $E_{system_i}$ 는 전송을 제외한 소모 에너지를 나타낸다. 이때,  $E_{system_i}$ 는 수신, 대기 상태의 에너지가 포함되고, 모든 노드가 비슷하게 유지된다. 한편,  $E_{transmission_i}$ 는 전송하는 데이터양에 따라 크게 달라질 수 있는데, 이  $E_{transmission_i}$ 는

$$E_{transmission_i} = S_i \beta d_i^\alpha \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $S_i$ 는 노드  $i$  전송할 데이터양,  $\beta$ 는 1비트를 1미터 전송하는데 소모되는 에너지,  $\alpha$ 는 경로 손실,  $d_i$ 는 노드  $i$ 의 전송 거리를 나타낸다. 이때,  $S_i$ 는 노드  $i$  자체에서 수집한 데이터와 다른 노드로부터 전달받은 데이터를 포함한다. 따라서 노드  $i$ 의 소모 에너지는

$$E_{consume_i} = (S_{data_i} + S_{relay_i}) \beta d_i^\alpha + E_{system_i} \quad (4)$$

가 된다. 여기서  $S_{data_i}$ 는 수집한 데이터양,  $S_{relay_i}$ 는 주변 노드로부터 전달받은 데이터양을 나타낸다. 위의 식 (4)를 (1)에 대입하여 수집하는 데이터양에 따른 노드의 예상 남은 에너지를 구할 수 있다.

### 2. 노드 동작 모드

노드는 데이터 전송 주기  $p_{tx}$  마다 잔존 에너지의 상태에 따라 자신의 동작 모드를 변경하게 된다. 노드는 일반 모드로 동작하다가, 수집되는 에너지가 넘칠 것으로 예상될 경우, 고성능 모드로 변경한다. 각 모드에서 노드는 다음과 같은 동작을 한다.

**일반 모드:** 노드의 에너지가 일반적인 상태일 때의 동작 모드이다. 노드의 에너지 소모를 줄이기 위해, 압축하지 않은 데이터를 더 적은 전력으로 전송한다.

**고성능 모드:** 여분의 에너지가 발생할 것으로 예상될 경우 사용하는 모드로, 여분의 에너지를 활용하여 중계 노드의 에너지 소모를 줄인다. 이 모드에서 노드는 데이터 압축 전송 기법을 이용하여 전송되는 데이터의 크기를 줄이거나, 전송 범위를 확장하여 패킷 전송 홉 수를 줄여서 중계 노드의 부하를 줄인다.

고성능 모드로 동작하는 노드의 에너지가 고갈될 것으로 예상될 경우, 노드는 자신의 동작 모드를 일반 모드로 변경하여, 에너지 소모를 줄인다.

### 3. 동작 모드 변경 방법

각 노드는 데이터 전송 주기  $p_{tx}$  마다 예상 에너지양을 예측하여 자신의 모드를 결정한다. 시간  $t$ 일 때,  $p_{tx}$  시간 후의 예상 에너지양은 식 (1)과 (4)를 이용하여 예측할 수 있다. 식 (1)의  $E_{harvest_i}(t, p_{tx})$ 는 기존의 수집 에너지 예측 기법들[10, 11]을 이용하여 예측하고, 식 (4)의  $S_{relay_i}$ 는 이때까지의 중계 데이터양의 이동평균을 이용하여 예측할 수 있다.

노드가 일반 모드로 동작할 때, 식 (1)으로 구한  $p_{tx}$  후의 예상 남은 에너지가 배터리의 용량  $E_{full_i}$ 를 초과할 것으로 예상될 경우, 노드는 남은 에너지를 활용하여 중계노드의 에너지 소모를 줄여야 한다.

즉,

$$E'_{residual_i}(t, p_{tx}) > E_{full_i} \quad (5)$$

를 만족시킬 경우, 노드는 고성능 모드를 선택한다.

노드가 고성능 모드로 동작할 때, 예상 에너지가 노드의 최소 동작 에너지보다 적을 경우, 노드가  $p_{tx}$  기간에 정지될 수 있기 때문에, 노드는 일반 모드로 변경하여 에너지를 절약한다. 즉,

$$E'_{residual_i}(t, p_{tx}) < E_{bottom_i} \quad (6)$$

를 만족시킬 경우, 노드는 일반 모드를 선택한다.

#### 4. 고성능 모드에서의 기법 선택

고성능 모드로 동작하는 노드는 남은 에너지를 활용하여 중계 노드의 에너지 소모를 줄인다. 이때, 노드는 데이터를 압축하거나, 전송 거리를 늘려서 전송 홉 수를 줄임으로써 중계 노드의 에너지 소모를 줄일 수 있다.

남은 에너지를 효율적으로 사용하기 위해, 압축 기법과 전송 거리 조절 기법 중에서 중계 노드의 에너지 소모를 더욱 줄일 수 있는 기법을 선택해야 한다. 이를 위해, 각 기법을 사용했을 때, 그 노드에서 전송하는 데이터에 대한 중계 노드의 에너지 소모를 측정해야 한다. 노드  $i$ 가 데이터 전송 시, 데이터가  $H$ 홉을 거쳐 싱크 노드에 도착할 때, 중계 노드들의 소모 에너지  $E_{hop_i}$ 는 식 (3)에 의해 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E_{hop_i} = (S_{relay_i} + S_{data_i})\beta d_i^{\alpha} H \quad (7)$$

데이터 압축 기법을 이용할 경우,  $S_{data_i}$ 가 압축률이  $R_{compression}$ 인 압축 기법으로 압축되어  $S_{data_i}(1-R_{compression})$ 로 줄어들기 때문에 데이터 압축 기법을 사용할 경우, 중계 노드의 에너지 소모  $E_{hop}^{compression}$ 는

$$E_{hop}^{compression} = (S_{relay_i} + S_{data_i}(1-R_{compression}))\beta d_i^{\alpha} H \quad (8)$$

가 된다.

전송 거리 조절 기법을 이용할 경우, 중계 노드의 수  $H$ 가 전송 거리 확장으로 줄어드는 홉 수  $H_{reduced}$  만큼 감소한다. 따라서 전송 거리 조절 기

법을 사용할 때, 중계 노드의 에너지 소모  $E_{hop_i}^{range}$ 는

$$E_{hop_i}^{range} = (S_{relay_i} + S_{data_i})\beta d_i^{\alpha} (H - H_{reduced}) \quad (9)$$

가 된다.

위의 식 (8)과 (9)를 활용하여 각 기법에서 중계 노드의 에너지 소모를 계산하여 비교하면 어떤 기법이 중계 노드의 에너지 소모를 줄이는 것에 더 효과적인지를 알 수 있다. 따라서

$$E_{hop}^{compression} > E_{hop_i}^{range} \quad (10)$$

일 경우, 전송 거리 조절 기법의 효율이 좋기 때문에, 노드는 전송 거리 조절 기법을 선택하고 반대의 경우, 데이터 압축 기법을 선택한다.

본 논문에서 제안하는 기법은 이와 같이 모드와 기법을 선택함으로써 노드의 에너지가 남을 경우, 이를 활용하여 데이터를 압축하거나 전송 거리를 확장함으로써, 중계 노드의 에너지 소모를 줄일 수 있다.

## IV. 성능 평가

제안된 기법(CompTR)의 성능 분석을 위해 SolarCastalia [12] 시뮬레이터를 사용하였고, 데이터 압축만을 사용한 기법(Comp), 전송 범위 조절만을 사용한 전송 기법(TR), 데이터 압축과 전송 범위 조절을 하지 않은 일반 전송 기법(Normal)의 정전시간과 데이터 수집량을 비교하였다.

시뮬레이션은 120m×120m의 필드에서 300개

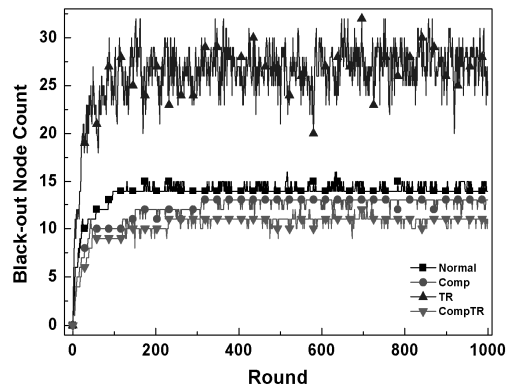


그림 2. 전송 기법별 정전 노드 비교

Fig. 2 Compare Cumulative Blackout Nodes

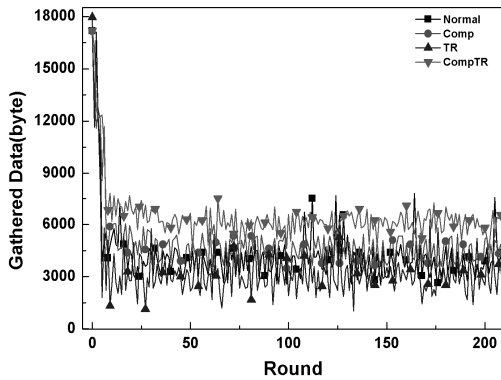


그림 3. 라운드(20min)에 따른 전송 기법별 수집 데이터양 비교

Fig. 3 The Number of Gathered Data in a Sink Node with Time(Round)

노드를 무작위로 배치하고, 노드의 송신 파워는 일반 모드일 때  $-7\text{dBm}$ , 전송 거리를 증가시킬 때  $0\text{dBm}$ 으로 설정했다. 데이터 압축은 S-LZW 기법을 사용했다. 시뮬레이션은 약 10일(1,000라운드) 동안 수행했으며, 각 실험을 10번 반복한 평균값을 구했다.

그림 2는 1,000라운드 동안의 기법별 정전 노드의 수를 비교한 것이다. 여기서 제안 기법이 중계 노드의 작업을 감소시켜 정전 발생을 억제한 것을 알 수 있다.

그림 3은 라운드에 따른 전송 기법별 수집 데이터양을 비교한 결과이다. 200 라운드 기준으로 제안 기법이 1,289,760 byte의 데이터를 수집하고, Comp는 971,940 byte, Normal은 844,500 byte, TR은 662,280 byte의 데이터를 수집하였다.

제안된 기법은 평균적으로 한 라운드에 6,231 byte의 데이터를 수집하여 다른 기법들에 비해 38~100%의 데이터를 더 수집한 것을 알 수 있다. 이것은 그림 2에서와 같이 중계 노드의 정전을 막아서 데이터 전송 성공률이 상승했기 때문이다.

위와 같은 실험 결과 제안된 기법은 노드의 남은 에너지를 이용하여 중계 노드의 작업을 줄여서 정전 발생을 억제하고, 이로 인해 전체 네트워크의 데이터 수집률을 높일 수 있는 것을 알 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 에너지 수집형 무선 센서 네트워크에서 데이터의 수집량을 늘리기 위해 여분의 에

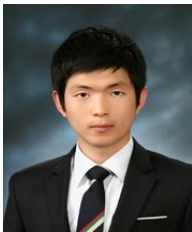
너지를 데이터 압축이나 전송 범위 확장에 사용하여 중계 노드의 부하를 줄이는 기법을 제안했다. 에너지가 남은 노드는 위의 두 가지 기법 중 하나를 선택했을 때의 중계 노드의 에너지 효율을 예측하여 더욱 효율적인 기법을 선택한다. 이로 인해 중계 노드에 전달되는 데이터양이 감소하고 노드의 전송 에너지가 줄어, 노드의 정전시간을 감소시킨다. 실험 결과, 제안된 기법이 다른 기법에 비해 노드의 정전시간이 감소하여 전체 데이터 수집량이 증가한 것을 확인하였다.

## References

- [1] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks*, Vol. 52, No. 12, pp. 2292-2330, 2008.
- [2] S. Sudevalayam, P. Kulkarni, "Energy harvesting sensor nodes: survey and implications," *Proceedings of IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 13, No. 3, pp. 443-461, 2011.
- [3] C.M. Sadler, M. Martonosi, "Data compression algorithms for energy-constrained devices in delay tolerant networks," *Proceedings of 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 265-278, 2006.
- [4] T.A. Welch, "A technique for high-performance data compression," *IEEE Computer*, Vol. 17, No. 6, pp.8-19, 1984.
- [5] M. Burrows, D.J. Wheeler, "A block-sorting lossless data compression algorithm," *Systems Rearch Center Technical Report 124*, 1994.
- [6] I. Yoon, J. Yi, S. Jeong, J. Jeon, D. Noh, "Dynamic sensing-rate control scheme using a selective data-compression for energy-harvesting wireless sensor networks," *Institute of Embedded Engineering of Korea*, Vol. 11, No. 2, pp. 79-86, 2016.(in Korea)
- [7] N.N. Encarnacion, H. Yang, "A simple energy harvesting algorithm for wireless sensor networks," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 359-364, 2012.
- [8] K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," *Proceedings of the*

- 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, pp. 27-34, 2003.
- [9] Y. Yang, L. Wang, D.K. Noh, T.F. Abdelzager, "Solarstore: enhancing data reliability in solar-powered storage-centric sensor networks," Proceeding of 7th conference on Mobile Systems, Applications, and Services, pp. 333-346, 2009.
- [10] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, M.B. Srivastava, "Power management in energy harvesting sensor networks," ACM Transactions in Embedded Computing Systems, Vol. 6, No. 4, pp.1-38, 2007.
- [11] J.R. Piorno, C. Bergonzini, D. Atienza, T.S. Rosing, "Prediction and management in energy harvested wireless sensor nodes," Proceedings of 1st IEEE International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, pp. 6-10, 2009.
- [12] J. Yi, M. Kang, D. Noh, "SolarCastalia-solar energy harvesting wireless sensor network simulator," International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 2015, pp. 1-10, 2015.

**Jun Min Yi (이 준 민)**



He received the M.S. degree in Electric Engineering from Soongsil University, Korea, in 2015. He is currently a Ph.D. student in School of Software Convergence at Soongsil University. His research interests are cyber-physical system, embedded system, ubiquitous sensor network, and energy harvesting system.  
Email: jmyi@ssu.ac.kr

**Dong Kun Noh (노 동 건)**



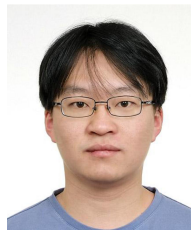
He received the Ph.D. degree in Computer Science and Engineering from Seoul National University in 2007. He is currently assistance professor in School of Software Convergence at Soongsil University. His primary research interests include embedded system, mobile computing, and ubiquitous sensor network.  
Email: dnoh@ssu.ac.kr

**Eomji Oh (오 엄 지)**



She received the B.S. degree in Electric Engineering from Soongsil University, Korea, in 2016. She is currently a M.S. student in School of Software Convergence at Soongsil University. Her research interests include cyber physical system, embedded system software, and ubiquitous sensor network.  
Email: ejoh@ssu.ac.kr

**Ikjune Yoon (윤 익 준)**



He 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.  
Email: ikjune.yoon@gmail.com