

태양 에너지 수집형 무선 센서 네트워크에서 데이터 압축과 순방향 오류 정정을 이용한 에너지 활용 기법

윤익준*

Efficient Energy Management Using Compression and Forward Error Correction for Solar-Powered Wireless Sensor Networks

Ikjune Yoon*

요약

본 논문에서는 태양 에너지를 이용하는 무선 센서 네트워크에서 남은 에너지를 데이터 압축이나 순방향 오류 정정에 사용함으로써, 싱크 노드에 도달하는 데이터를 증가시키는 기법을 소개한다. 이 기법에서 각 노드는 주기적으로 자신의 전송 데이터 한계를 결정하고, 자식 노드에게 전달하여 과도한 데이터가 전송되는 것을 막는다. 이로 인해 에너지가 남을 경우, 압축이나 순방향 오류 정정 중 기법을 선택하여 싱크 노드에 더 많은 데이터가 전달될 수 있게 한다. 시뮬레이션 결과 제안된 기법은 대부분의 상황에서 기존의 기법들에 비해 정전 노드의 발생을 억제했고, 싱크 노드에서 더 많은 데이터를 수집한 것을 알 수 있었다.

Key Words : wireless sensor network, energy-harvesting, energy management, compression, forward error correction

ABSTRACT

We introduce a scheme, in a solar-powered wireless sensor network that periodically collects data from environments, to increase obtained data by utilizing the extra energy for data compression or forward error correction. In this scheme, each node periodically determines its relay data limit and notifies it to the child nodes to prevent excessive data from being transmitted. After that, if energy is expected to be overflowed, the node applies more efficient method between data compression and forward error correction to deliver more data to the sink node. Simulation results show that the proposed scheme, in most cases, decreases the number of blackout nodes and obtains more data at the sink node in most situations.

I. 서론

무선 센서 네트워크(WSN, Wireless Sensor Network)는 광범위한 지역이나 사람이 접근하기 힘든 지역의 정보를 얻기 위한 방법으로 사용되어 왔다. WSN의 노드들은 배터리를 이용하기 때문에 제한된 수명을 가지고 있고, 배터리가 고갈되면 노드를 교체

하거나 전체 네트워크를 새로 구축해야 한다. 따라서 WSN에서는 주로 노드의 수명을 연장시키기 위한 기법들이 연구되어 왔고^[1], 그 중 에너지 수집형 노드를 이용한 에너지 수집형 무선 센서 네트워크(EH-WSN, Energy-harvesting WSN)가 각광받고 있다^[2]. 이 노드는 주변 환경으로부터 에너지를 생산하기 때문에, 제한된 수명 문제를 극복할 수 있고 이론적으로 영원히

* First Author : Soongsil University Department of Smart Systems Software, Ikjune.Yoon@gmail.com, 정회원
논문번호 : KICS2017-07-189, Received July 3, 2017; Revised July 14, 2017; Accepted July 21, 2017

살 수 있다. 특히, 태양 에너지를 이용한 노드는 다른 에너지원에 비해 높은 전력 밀도(약 15mW/cm²)로 인해 더욱 각광받고 있다.

에너지 수집형 센서 노드는 에너지를 계속 생산할 수 있지만, 수집되는 에너지보다 더 많은 에너지를 소모할 경우에는 에너지가 고갈될 수 있다. 반대로, 수집되는 에너지가 저장 용량의 한계를 넘을 경우 에너지를 낭비하게 될 수 있다. 이를 극복하기 위해, 에너지 소모량을 조절함으로써 노드의 에너지가 고갈되지 않고 넘치지도 않는 범위 내에서 에너지를 활용하는 기법이 연구되어야 한다^{3,4)}.

노드의 남은 에너지를 활용하여 데이터를 압축하는 방법이 있다⁵⁾. 이는 압축에 많은 에너지가 소모되지만 전송되는 데이터양을 줄여 전송 에너지를 감소시킨다. 특히, WSN에서는 다른 노드가 패킷을 중계해 줘야하기 때문에 전송 데이터를 줄일 경우 중계 노드의 부담을 줄일 수 있다.

여분의 에너지를 활용하기 위한 또 다른 방법으로는 순방향 오류 정정(FEC, Forward Error Correction)을 적용하여 오류율을 낮추는 방법이 있다⁶⁾. FEC는 패킷에 패리티를 추가하여 전송함으로써 오류를 복구할 수 있게 한다. FEC는 패리티를 추가하여 전송하기 때문에 전송 에너지를 더 소모하고, FEC 인코딩과 디코딩 에너지를 더 소모하게 되지만, 오류율을 낮춤으로써 싱크 노드에 데이터가 도달할 확률을 높여준다.

기존의 EH-WSN 연구들은 노드의 남은 에너지를 압축에 이용하거나^{7,8)}, FEC를 사용하여 오류율을 낮추는데 사용했다⁹⁾. 이러한 방식들은 압축의 한계나 오류율 감소의 한계로 인하여 에너지 효율을 일정량 이상 올릴 수 없고, 노드의 위치나 데이터 전송량에 따라 에너지 효율이 감소할 수 있다.

이를 극복하기 위하여 본 논문에서는 노드의 남은 에너지를 활용하여 압축이나 FEC를 선택적으로 적용함으로써 에너지의 효율을 높이고, 싱크 노드에 도달하는 데이터양을 증가시키는 기법을 제안한다. 제안된 기법에서 노드는 주기적으로 가용 에너지와 소모 에너지를 예측하고, 가용한 에너지 범위 내에서 압축과 FEC중 사용 가능한 기법을 적용하여 중계 노드의 에너지 효율을 높이고, 싱크 노드에 도달하는 데이터양을 증가시킨다. 또한 최대 전송할 수 있는 데이터양을 제한하고 이에 맞는 수집 주기를 선택함으로써, 중계 노드들이 데이터를 전달하는데 과도한 에너지가 소모되는 것을 방지한다.

II. 관련 연구

WSN에서 사용되는 노드는 처리 성능이 낮고 메모리가 충분하지 않기 때문에 기존의 기법들을 그대로 사용할 수 없다. 따라서 이러한 제한된 환경에서 사용할 수 있는 에너지 관리 기법이 필요하다.

[3]에서는 EH-WSN에서 노드가 영원히 살 수 있는 에너지 경계를 제시했다. [4]에서는 EH-WSN에서 에너지 수집율과 소모율을 이용하여 노드의 동작을 결정하는 에너지 모델을 제안했다. [10]에서는 센서 노드에서 사용 가능한 압축 알고리즘을 제안했다. 이는 사전 기반의 비손실 압축 기법인 LZW 알고리즘을 센서 노드에서 동작할 수 있도록 경량화한 S-LZW (Sensor LZW) 기법이다. [7]에서는 EH-WSN 환경에서 노드의 에너지를 고려하여 선택적으로 압축 알고리즘을 선택하는 기법을 제안했다. 또한 [11]에서는 EH-WSN 환경에서 데이터 압축과 전송 전력을 조절함으로써 에너지의 효율을 높이는 기법을 제안했다.

WSN에서는 전송 오류를 줄이기 위해 FEC를 적용하는 기법이 연구되었다. FEC는 전통적으로 오류 복구에 사용되던 Auto repeat request(ARQ) 방식과는 달리, 오류가 발생한 패킷을 받은 노드가 직접 복구할 수 있도록 추가적인 패리티 정보를 추가해서 전송한다. WSN에서는 에너지와 오류율을 고려했을 때, Reed-Solomon(RS) 기법이 가장 효율적으로 알려져 있다⁶⁾. [9]에서는 EH-WSN에서 FEC 사용 시, 노드의 에너지 상태에 따라 패리티의 길이를 변화시켜 에너지를 활용하는 기법을 제안했다.

III. 압축과 FEC를 이용한 노드 에너지 활용

본 논문에서는 태양 에너지를 이용한 EH-WSN에서, 노드가 수집한 에너지를 활용하여 싱크 노드에 도달하는 데이터양을 증가시키는 기법을 제안한다. 이 기법은 노드가 주기적으로 환경을 감지하고, 데이터를 자주 수집할수록 정보의 신뢰성이 향상되는 응용을 대상으로 고안되었다.

제안된 기법은 크게 두 가지 방법으로 싱크 노드에 도달하는 데이터양을 증가시킨다. ① 노드의 여분의 에너지를 활용하여 데이터를 압축하거나, FEC를 이용하여 오류율을 감소시키거나, 이들 둘 다를 적용하여 데이터를 전송한다. ② 네트워크 전체의 에너지 상황에 따라 데이터 수집량을 조절한다.

그림 1은 본 기법의 동작을 간략히 보여준다.

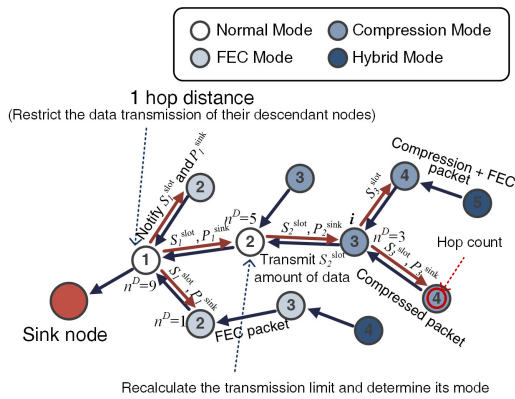


그림 1. 제안된 기법의 개략도
Fig. 1. Overview of the proposed scheme

3.1 노드의 에너지 모델

노드는 수집되는 에너지와 소모 에너지를 고려하여 수집 데이터양과 동작 모드를 결정한다. 이를 위해 먼저 자신의 에너지 소모량과 수집량을 예측해야 한다.

3.1.1 노드의 소모 에너지

노드가 s 바이트의 데이터를 전송할 때, 소모하는 에너지양 $e_{consume}(s)$ 는

$$e_{consume}(s) = e_{trans}(s) + e_{elec} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. $e_{trans}(s)$ 는 s bytes의 데이터를 전송할 때의 전송 에너지, e_{elec} 는 수신 에너지를 포함한 나머지 에너지를 나타낸다. 여기서 $e_{trans}(s)$ 은 1 바이트를 전송할 때 필요한 에너지 e_{trans}^{unit} 을 이용하여 $e_{trans}^{unit}s$ 로 나타낼 수 있다. 또한, 노드가 데이터 압축이나 FEC를 사용할 경우, 압축에 필요한 에너지 $e_{comp}(s)$ 과 FEC 인코딩과 디코딩 에너지 $e_{enc}(s)$ 와 $e_{dec}(s)$ 가 추가로 소모되어야 한다. 따라서 위의 소모 에너지양 $e_{consume}(s)$ 는

$$e_{consume}(s) = e_{trans}^{unit}s + e_{elec} + e_{enc}(s) + e_{dec}(s) + e_{comp}(s) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다.

3.1.2 노드의 에너지 수집량

두 번째로, 우리는 노드의 태양 에너지 수집량을 예측해야 한다. 태양 에너지는 시간, 날씨, 계절에 따라 변할 수 있다. 우리는 시간별 태양에너지 예측 기법인

ProEnergy^[12]을 이용하여 이를 예측한다.

3.1.3 시간별 사용 가능 에너지 할당

노드가 밤과 낮에 관계없이 끊임없이 동작하려면 식 (2)의 $e_{consume}(s)$ 을 노드가 계속 동작할 수 있는 범위로 조절해야 한다. 이를 위해, 우리는 하루를 N 개의 슬롯으로 나누고, 각 슬롯에 사용 가능한 에너지를 할당하여 끊임없는 동작을 할 수 있게 했다. 슬롯별 사용 에너지양 e_{alloc} 은^[13]에서 제안된 에너지 할당 방법으로 결정한다.

노드가 죽지 않는 범위 내에서 남은 에너지를 효율적으로 사용하기 위해서는 각 슬롯에 할당된 e_{alloc} 이하의 에너지를 최대한 많이 사용해야 한다. 즉, 우리는 노드의 에너지 효율을 높이기 위해,

$$e_{alloc} \geq e_{consume}(s) \quad (3)$$

을 만족시키는 $e_{consume}(s)$ 을 결정해야 한다.

3.2 노드의 동작

모든 노드는 주기 p_{tr} 마다 수집된 데이터를 싱크 노드에 전달한다. 끊임없는 동작을 위해 주기적으로 각 슬롯별로 에너지를 할당^[13]하고, 노드의 전송 경로를 결정한다. 그 후, 싱크 노드로부터 1홉 거리에 있는 노드 n_1 들은 모든 노드들의 데이터를 공평하게 중계할 수 있도록, 한 노드가 전송할 수 있는 데이터양 s_1^{slot} 을 결정한다. 그리고 싱크 노드까지의 패킷 전송 성공률 P_1^{sink} 을 결정한 뒤, s_1^{slot} 과 P_1^{sink} 을 자신의 자식 노드들에게 전달한다(그림 1의 1번 노드). 이를 전달받은 노드는 이 값과 에너지 상태를 고려하여 모드를 선택한 후, 자신의 s^{slot} 과 P^{sink} 을 결정하여 자식 노드에게 전달한다(그림 1의 2번 노드). 이렇게 모든

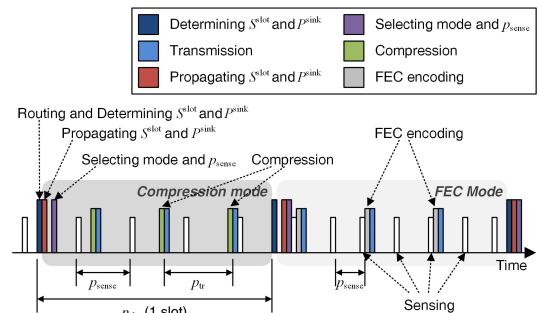


그림 2. 시간에 따른 노드의 동작
Fig. 2. Node operations over time

노드는 자신의 모드와 전달할 수 있는 데이터양을 결정한다. 그림 2은 시간에 따른 노드의 동작을 간략히 보여준다.

노드가 선택할 수 있는 모드는 다음과 같다.

• 일반 모드 (그림 3의 ①)

노드가 기본적인 동작만 하는 모드이다. 노드는 부모 노드로부터 전달받은 s_i^{slot} 와 P_i^{sink} 에 맞게 주기적으로 데이터를 전송한다.

• 압축 모드 (그림 3의 ②)

해당 슬롯에 할당된 에너지가 데이터를 압축해서 전송하기에 충분한 경우, 노드는 압축 모드를 선택한다. 이 모드의 노드는 압축되어 전송되는 데이터양이 s_i^{slot} 을 넘지 않는 범위 내에서 최대한 많은 데이터를 수집하고, 이를 압축하여 전송한다. 데이터를 압축하는데 많은 에너지가 소모되지만, 압축된 데이터를 전송하기 때문에, 싱크 노드에서 일반 모드와 같은 양의 패킷을 받더라도, 더 많은 센싱 데이터를 얻을 수 있다.

• FEC 모드 (그림 3의 ③)

해당 슬롯에 할당된 에너지가 FEC를 적용하기에 충분할 경우, 노드는 FEC모드를 선택한다. 이 모드의 노드는 패킷에 FEC를 적용하여 오류 복구가 가능하게 함으로써, 패킷 오류율을 낮춘다. FEC는 패러티 데이터가 추가되기 때문에, 전송 소모 에너지가 커지지만, 오류율을 낮춤으로써 싱크 노드에 도달하는 데이터양의 기댓값을 높일 수 있다.

• 혼합 모드 (그림 3의 ④)

압축과 FEC를 둘 다 적용할 수 있을 정도로 에너지가 충분할 경우, 노드는 이를 둘 다 사용하는 혼합 모드를 선택한다. 이 모드의 노드는 압축과 FEC에 더 많은 에너지를 소모하지만, 더 많은 데이터를 낮은 오류율로 전송함으로써 싱크 노드가 더 많은 데이터를 얻을 수 있게 한다.

3.3 모드 선택

각 노드는 식 (3)을 만족시키는 모드를 선택해야 한다. 이를 위해, 노드는 각 모드에서 소모되는 에너지양을 알아야 하고, 이는 전송 데이터양에 따라 달라지기 때문에, 각 모드의 전송량을 알아야 한다.

[14]에서 제안된 기법과 같이, 싱크 노드로부터 i 홉 거리의 노드 n_i 는 $i-1$ 홉 거리에 있는 부모 노드 n_{i-1} 로부터, n_{i-1} 이 중계할 수 있는 한계 전송량 s_{i-1}^{slot} 을 전달 받는다. 이를 받은 노드는 n_{i-1} 가 s_{i-1}^{slot} 만큼의 데이터를 전송할 수 있도록 자신의 중계 한계량 s_i^{slot} 을 결정해야 한다. 노드 n_i 의 전송 성공률 P_i 를 고려하여 s_i^{slot} 을 구하면 $s_{i-1}^{\text{slot}}/P_i$ 가 된다. 이렇게 계산된 s_i^{slot} 을 자손 노드에게 전달하여 모든 노드가 s_n^{slot} 을 계산할 수 있게 한다.

만약 노드가 FEC를 사용할 경우, 오류율이 변하기 때문에, 이를 고려하여 전송 데이터양을 계산해야 한다. FEC를 사용했을 때의 전송 데이터양 s_i^{FEC} 을 FEC를 사용했을 때의 전송 성공률 P_i^{FEC} 로 다시 계산해보면 $s_{i-1}^{\text{slot}}/P_i^{\text{FEC}}$ 가 된다.

노드가 압축을 사용할 경우, 부모 노드에 s_i^{slot} 만큼의 데이터를 전송해야하기 때문에 압축된 데이터의 크기가 s_i^{slot} 가 되도록 추가 데이터를 수집해야 한다. 즉, 압축률이 r (원본 크기 / 압축된 크기)일 때, $s_i^{\text{slot}} \cdot r$ 만큼의 데이터를 수집해야 하고, 이를 압축하여 s_i^{slot} 만큼의 데이터를 전송하게 된다.

노드가 소모하는 에너지를 알기 위해서는 앞에서 결정된 데이터양을 전송할 때 필요한 에너지양을 알아야 한다. 노드가 한 슬롯 동안, n_i^D 개의 자손 노드로부터 s_i^{slot} 의 데이터를 전달받을 때, 노드 n_i 의 소모 에너지양은 위의 식 (2)에 의해,

$$e_{\text{consume}_i}(s_i^{\text{slot}}) = e_{\text{trans}}^{\text{unit}} s_i^{\text{slot}} (1 + n_i^D) + e_{\text{elec}} \quad (4)$$

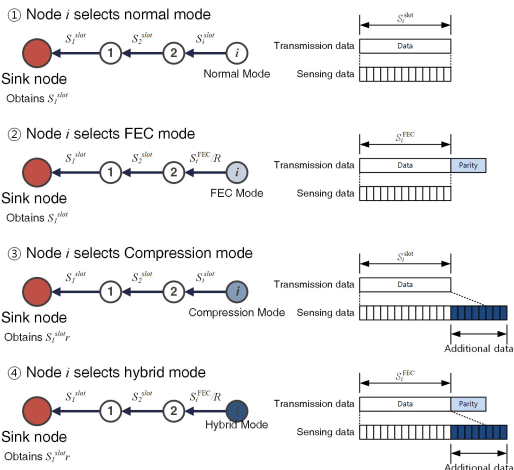


그림 3. 4가지 모드의 동작
Fig. 3. 4 modes and their operations

가 된다. 만약 노드가 전체 데이터 길이 대비 원본 데이터 길이가 R 인 FEC를 사용할 경우, 패리티 데이터를 추가하여, s_i^{FEC}/R 만큼의 데이터를 전송해야 하고, 다른 노드의 데이터를 중계할 때는 FEC를 적용하지 않고 s_i^{slot} 만큼의 데이터를 전송해야 한다. 또한 FEC 인코딩에 에너지가 추가로 소모된다. 즉, FEC기법을 사용할 때의 소모에너지 $e_{consume_i}^{FEC}$ 는

$$e_{consume_i}^{FEC} = e_{trans}^{unit}(s_i^{FEC}/R + s_i^{slot} n_i^D) + e_{enc}(s_i^{FEC}/R) + e_{elec} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $e_{enc}(s_i^{FEC}/R)$ 는 s_i^{FEC}/R 크기의 데이터를 FEC 인코딩하는데 필요한 에너지를 나타낸다.

한편, 압축을 사용할 경우, 수집되는 데이터 크기는 $s_i^{slot} r$ 이고 전송 데이터 크기는 s_i^{slot} 가 된다. 또한 압축에 소모되는 에너지가 추가로 소모된다. 따라서 데이터 압축을 사용할 때의 소모에너지 $e_{consume_i}^{comp}$ 는

$$e_{consume_i}^{comp} = e_{trans}^{unit} s_i^{slot} (1 + n_i^D) + e_{comp}(s_i^{slot} r) + e_{elec} \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $e_{comp}(s_i^{slot} r)$ 는 크기가 $s_i^{slot} r$ 인 데이터 압축에 필요한 에너지를 나타낸다.

압축과 FEC를 둘 다 사용할 경우, 수집된 데이터가 압축된 후, FEC를 적용해야하기 때문에, 압축된 데이터양이 s_i^{FEC} 가 되어야하고, 압축 전 수집된 데이터양이 $s_i^{FEC} r$ 가 되어야 한다. 또한 실제 전송되는 데이터 크기는 FEC의 패리티 데이터가 추가되어야하기 때문에, s_i^{FEC}/R 가 된다. 따라서 압축과 FEC를 둘 다 사용할 때의 소모 에너지 $e_{consume_i}^{both}$ 는

$$e_{consume_i}^{both} = e_{trans}^{unit}(s_i^{FEC}/R + s_i^{slot} n_i^D) + e_{elec} + e_{comp}(s_i^{FEC} r) + e_{enc}(s_i^{FEC}/R) \quad (7)$$

가 된다.

각 노드는 위의 식 (5)~(7)에서 계산한 소모 에너지를 이용하여 자신의 한 슬롯 동안의 소모 에너지를 계산하고, 할당된 에너지 내에서 적용 가능한 모드를 선택해야 한다. 따라서 노드는 다음과 같이 자신의 모

Algorithm 1 Mode selection algorithm

Require: Determining e_{alloc_i} using [13]
Require: Receiving s_{i-1}^{slot} and P_{i-1}^{sink} from n_{i-1}

- 1: Calculate s_i^{slot} and send it to descendant nodes
- 2: Calculate $e_{consume_i}^{FEC}$, $e_{consume_i}^{comp}$ and $e_{consume_i}^{both}$ using (5), (6), and (7)
- 3: **if** $e_{alloc_i} \geq e_{consume_i}^{both}$ **then**
- 4: $Mode \leftarrow Hybrid\ mode$
- 5: **else if** $e_{alloc_i} \geq e_{consume_i}^{comp} \wedge e_{alloc_i} < e_{consume_i}^{FEC}$ **then**
- 6: $Mode \leftarrow Compression\ mode$
- 7: **else if** $e_{alloc_i} < e_{consume_i}^{comp} \wedge e_{alloc_i} \geq e_{consume_i}^{FEC}$ **then**
- 8: $Mode \leftarrow FEC\ mode$
- 9: **else if** $e_{alloc_i} \geq e_{consume_i}^{comp} \wedge e_{alloc_i} \geq e_{consume_i}^{FEC}$ **then**
- 10: $Mode \leftarrow Call\ METHODSELECTION()$
- 11: **else**
- 12: $Mode \leftarrow Normal\ mode$
- 13: **end if**
- 14: **function** $METHODSELECTION()$
- 15: Calculate ρ_{i-1}^{FEC} and ρ_{i-1}^{comp} using (15) and (17)
- 16: **if** $\rho_{i-1}^{FEC} > \rho_{i-1}^{comp}$ **then**
- 17: **return** $FEC\ mode$
- 18: **else**
- 19: **return** $Compression\ mode$
- 20: **end if**
- 21: **end function**

그림 4. 모드 선택 알고리즘
 Fig. 4. Mode selection algorithm

드를 선택한다.

- $e_{alloc_i} \geq e_{consume_i}^{both}$ 이면 혼합 모드 선택
- $e_{alloc_i} \geq e_{consume_i}^{comp}$ 이고 $e_{alloc_i} < e_{consume_i}^{FEC}$ 이면 압축 모드 선택
- $e_{alloc_i} < e_{consume_i}^{comp}$ 이고 $e_{alloc_i} \geq e_{consume_i}^{FEC}$ 이면 FEC모드 선택
- $e_{alloc_i} < e_{consume_i}^{both}$ 이지만, $e_{alloc_i} \geq e_{consume_i}^{comp}$ 이고 $e_{alloc_i} \geq e_{consume_i}^{FEC}$ 인 경우, 압축모드와 FEC모드 중 하나 선택하여 적용
- $e_{alloc_i} < e_{consume_i}^{comp}$ 이고 $e_{alloc_i} < e_{consume_i}^{FEC}$ 일 경우, 압축이나 FEC를 사용하기에 충분한 에너지가 없기 때문에 일반 모드 선택

그림 4는 위의 모드 선택 과정을 의사부호로 보여준다.

3.4 압축 모드와 FEC 모드 선택

압축과 FEC를 둘 중 하나만 사용할 수 있는 경우, 노드는 중계 노드의 에너지 효율이 좋은 기법을 선택한다. 중계 노드의 에너지 효율 ρ 는 중계 노드의 에너지 소모 대비 싱크 노드에 전달되는 데이터양으로 나타낼 수 있다. 이를 위해 각각의 기법을 사용했을 때, 싱크 노드에 도달하는 데이터양과 중계 노드의 소모 에너지를 구해야 한다.

3.4.1 싱크 노드에서 얻는 데이터양과 중계 노드의 소모 에너지

자신의 데이터를 중계할 때, 오류로 인해 패킷이 중간에 사라질 수 있기 때문에 중계 노드에서 전송해야 하는 데이터양을 구하기 위해서는, 데이터 전송 노드부터 싱크 노드 사이의 중계 노드 전송 성공률을 고려해야 한다. 싱크 노드로부터 i 홉 떨어져 있는 노드 n_i 가 부모 노드 n_{i-1} 에 데이터를 전송할 때의 전송 성공률이 P_i 일 때, n_i 의 데이터가 싱크 노드까지 도달하

는 전송 성공률 P_i^{sink} 은 $\prod_{j=1}^i P_j$ 로 나타낼 수 있다. 이를 고려하여 n_i 가 s_i^{slot} 의 데이터를 전송 때, 싱크 노드에서 얻는 데이터양의 기댓값 s_{sink_i} 는

$$s_{\text{sink}_i} = s_i^{\text{slot}} P_i^{\text{sink}} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다.

n_i 의 데이터로 인해 중계 노드에서 소모되는 에너지를 계산하기 위해서는 각 중계 노드에 전달되는 데이터양을 알아야 하고, 이를 위해서는 각 중계 노드의 전송 성공률을 알아야 한다. 노드 n_i 는 n_{i-1} 로부터 P_{i-1}^{sink} 을 전달받고, P_i 는 [15]로 알 수 있지만, 1홉부터 $i-1$ 홉까지의 전송 성공률 $P_1 \sim P_{i-1}$ 은 알 수 없다. 따라서 우리는 $P_1 \sim P_{i-1}$ 대신 중계 노드의 평균 전송 성공률 \bar{P}_i 을 대신 이용한다. 1홉부터 i 홉까지의 평균 전송 성공률이 \bar{P}_i 일 때, P_i^{sink} 를 이용하여 이를 계산하면

$$P_i^{\text{sink}} \approx \prod_{j=1}^i \bar{P}_j = (\bar{P}_i)^i \quad (9)$$

로 나타낼 수 있으므로, \bar{P}_i 은 $\sqrt[i]{P_i^{\text{sink}}}$ 가 된다. 중계 노드 n_{i-1} , n_{i-2} , n_{i-3} ..., n_1 노드에 전달되는 데이터 양의 기댓값은 각각 $s_i^{\text{slot}} P_i$, $s_i^{\text{slot}} P_i P_{i-1}$, $s_i^{\text{slot}} P_i P_{i-1} P_{i-2}$, ..., $s_i^{\text{slot}} \prod_{k=0}^{i-2} P_{i-k}$ 이고, 이 기댓값과 \bar{P}_i 를 이용해서 전체 중계 노드가 n_i 에서 생성된 데이터를 전송할 때 소모되는 에너지 e_{relay_i} 을 구하면

$$e_{\text{relay}_i} = e_{\text{trans}}^{\text{unit}} \sum_{j=0}^{i-2} \left(s_i^{\text{slot}} \prod_{k=0}^j P_{i-k} \right) \approx e_{\text{trans}}^{\text{unit}} \sum_{j=0}^{i-2} s_i^{\text{slot}} P_i (\bar{P}_{i-1})^j \quad (10)$$

가 된다. 위의 식 (8)과 (10)를 이용하여 노드 n_i 의 데이터를 중계 노드가 전달 할 때, 중계 노드의 에너지 효율 ρ_i (bytes/J)는 다음과 같다.

$$\rho_i = s_{\text{sink}_i} / e_{\text{relay}_i} \quad (11)$$

3.4.2 FEC 모드 사용 시 중계 노드의 에너지 효율

FEC를 사용할 경우, 노드 n_i 은 s_i^{FEC} 만큼의 데이터를 P_i^{FEC} 의 확률로 n_{i-1} 로 전송한다. 이를 식 (8)에 대입하여 FEC를 사용할 때의 싱크 노드에 도달하는 데이터양을 구하면

$$s_{\text{sink}_i}^{\text{FEC}} = s_i^{\text{FEC}} P_i^{\text{FEC}} P_{i-1}^{\text{sink}} \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. 이 때, 패킷 전송 성공률 P_i^{FEC} 는 [15]에서 제안한 방식으로 계산할 수 있다.

두 번째로, FEC 사용 시 중계 노드의 소모 에너지 $e_{\text{relay}_i}^{\text{FEC}}$ 는 식 (10)에 s_i^{FEC} 과 P_i^{FEC} 을 대입하여

$$e_{\text{relay}_i}^{\text{FEC}} = e_{\text{trans}}^{\text{unit}} \sum_{j=0}^{i-2} s_i^{\text{FEC}} P_i^{\text{FEC}} (\bar{P}_{i-1})^j \quad (13)$$

와 같이 구할 수 있다. 위의 식 (12)과 (13)를 이용하여 FEC 사용 시 중계 노드의 에너지 효율 ρ_i^{FEC} (bytes/J)를 구하면

$$\rho_i^{\text{FEC}} = s_{\text{sink}_i}^{\text{FEC}} / e_{\text{relay}_i}^{\text{FEC}} \quad (15)$$

가 된다.

3.4.3 압축 모드 사용 시 중계 노드의 에너지 효율

압축을 사용할 경우 $s_i^{\text{slot},r}$ 만큼의 데이터를 수집해야 하기 때문에, 이를 식 (8)에 대입하여 싱크 노드에 도달하는 데이터양을 구하면

$$s_{\text{sink}_i}^{\text{comp}} = s_i^{\text{slot},r} P_i^{\text{sink}} \quad (16)$$

가 된다. 압축 사용 시 일반 모드와 같은 양의 데이터를 전송하고, 패킷 오류율도 변하지 않기 때문에 중계 노드의 소모 에너지는 식 (10)의 e_{relay_i} 와 같다. 따라서 위의 식 (16)와 (10)를 이용하여 압축 사용 시 중계 노드의 에너지 효율 ρ_i^{comp} (bytes/J)를 구하면

$$\rho_i^{\text{comp}} = s_{\text{sink}_i}^{\text{comp}} / e_{\text{relay}_i} \quad (17)$$

가 된다.

위의 식 (15)와 (17)의 ρ_i^{FEC} 과 ρ_i^{comp} 을 비교하면 노드 n_i 가 어느 기법을 사용했을 때, 중계 노드의 에너지 효율이 높은지 알 수 있다. 따라서 본 기법에서는 위의 두 변수를 비교하여 더 효율적인 모드를 선택한다. 그림 4의 MethodSelection 함수는 위의 과정을의 사부호로 보여준다.

3.5 데이터 수집 주기 계산

이전 절에서 우리는 노드의 동작 모드와 전송할 수 있는 데이터양을 결정했다. 노드는 이 데이터양에 맞게 데이터를 수집하기 위해 데이터 수집 주기를 결정해야 한다.

앞의 III장 3절에서 한 슬롯 동안 일반, 압축, FEC와 혼합 모드에서 수집해야 하는 데이터양은 각각 s_i^{slot} , $s_i^{\text{slot}_r}$, s_i^{FEC} 와 $s_i^{\text{FEC}_r}$ 로 결정했다. 따라서 노드가 한번에 s_{sense} 만큼의 데이터를 수집하고, 한 슬롯의 길이가 p_{slot} 일 때, 일반, 압축, FEC와 혼합 모드의 수집 주기 p_{sense} 는 각각 $p_{\text{slot}} s_{\text{sense}} / s_i^{\text{slot}}$, $p_{\text{slot}} s_{\text{sense}} / s_i^{\text{slot}_r}$, $p_{\text{slot}} s_{\text{sense}} / s_i^{\text{FEC}}$ 와 $p_{\text{slot}} s_{\text{sense}} / s_i^{\text{FEC}_r}$ 가 되어야 한다.

위와 같은 방법으로, 제안된 기법은 각 노드는 할당된 에너지와 자신의 소모 에너지, 중계 노드의 에너지 효율을 이용하여 자신의 모드와 전송 주기를 결정함으로써, 중계노드의 에너지 효율을 증가시키고 싱크 노드에 도달하는 데이터양을 증가시킬 수 있다.

3.6 기법 수행 부하

제안된 기법은 크게 노드의 에너지 할당, 전송 한계 s_i^{slot} 결정, 모드 결정과 데이터 수집 주기 결정의 동작을 한다. 이 중, 수행 부하가 큰 부분은 에너지 할당과, s_i^{slot} 를 결정하는 부분이고, 그 외의 부분은 O(1)의 간단한 연산을 통해 이루어진다. 에너지의 할당은 [13]의 기법을 통해 이루어지고, 이를 위해 선형 계획법 부하가 추가되어야 한다. 두 번째로 s_i^{slot} 는 [14]의 기법을

통해 결정되고, 이를 위해 모든 노드는 자신의 자손 노드의 수를 알아야 하고, 그 후, 중계 노드로부터 s_i^{slot} 를 전달받아야 한다. 자손 노드의 수를 알기 위해서는 모든 노드가 싱크 노드에 데이터를 한번 전송하면 자신에게 데이터를 전송하는 자손 노드 수를 알 수 있다. s_i^{slot} 는 싱크 노드로부터 모든 노드에 범람 방식을 이용하여 전달한다. 따라서 모든 노드가 싱크 노드로 데이터를 전송하는 부하와 싱크 노드에서 모든 노드로 데이터를 전송하는 부하 한 번씩이 추가되어야 한다. 이러한 동작들은 슬롯당 한 번씩 수행되므로 슬롯이 짧아질수록 더 많은 부하를 발생시킬 수 있다.

IV. 성능 평가

4.1 시뮬레이션 환경

우리는 제안된 기법의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행했다. 우리는 Solar-Castalia^[16]를 이용하여, 성능 비교를 위해 제안된 기법(Proposed)과 다른 다섯 가지 기법, 1) 일반적으로 데이터를 전송하는 기법(Naive), 2) 데이터를 압축하여 전송하는 기법(Compression), 3) FEC를 적용하여 전송하는 기법(RS), 4) FEC를 에너지상태에 따라 선택적으로 적용한 기법(Selective-RS)^[9], 5) 에너지 할당을 적용한 기법(Ad-sensing)^[14]의 성능을 측정했다. 압축 기법은 S-LZW^[11]를 사용했고, FEC는 [17]에서 가장 효율적이라고 언급한 RS(40,32)를 사용했다. 우리는 200개의 태양 에너지 수집형 노드를 무작위로 배치하여 시뮬레이션을 수행하였고, 30번 반복한 결과의 평균을 구

표 4. 시뮬레이션 인자들
Table 4. Simulation parameters

Parameters	Values
Number of nodes	200
Node topology	Random
Routing algorithm	MDT
Compression algorithm	S-LZW
FEC algorithm	RS(40,32)
Transmission range	10 m
Battery capacity	100 mAh
Tx current	17.4 mA
Rx current	18.8 mA
Idle current	0.426 mA
p_{slot}	1 hour
p_{sense}	10 - 60 sec

했다. 각 반복마다 모든 기법은 같은 노드 배치를 사용하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 주요 인자들을 보여준다.

4.2 시뮬레이션 결과

그림 5는 시간에 따른 정전 노드 수의 변화를 총 7일간 측정된 결과를 보여준다. 모든 기법들은 태양 에너지가 많은 낮에는 정전 노드가 발생하지 않다가 태양 에너지가 적은 시기에 정전 노드가 증가하는 것을 알 수 있다. 제안 기법과 Ad-sensing은 에너지 할당을 사용하여 밤에도 끊임없이 동작할 수 있게 했기 때문에 다른 기법들에 비해 늦게 정전 노드가 발생하기 시작하고, 더 적은 정전을 발생시키는 것을 알 수 있다.

그림 6은 시간에 따른 싱크 노드에 도달하는 데이터 수 변화를 측정된 결과를 나타낸다. 제안된 기법과 Ad-sensing은 다른 기법들이 야간에 데이터를 적게 얻는 것에 비해, 시간에 관계없이 고르게 데이터를 얻는 것을 알 수 있다. 한편, 제안된 기법은 새벽 무렵에

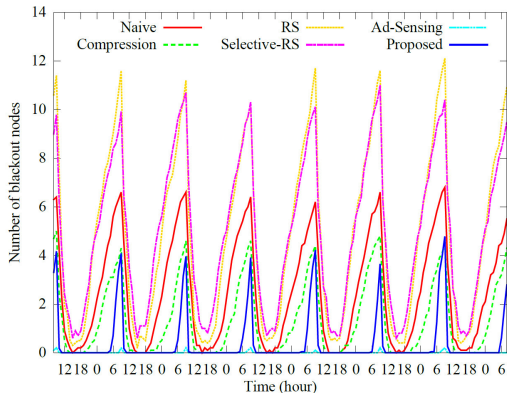


그림 5. 정전 노드 수의 변화
Fig. 5. Change in the number of blackout nodes

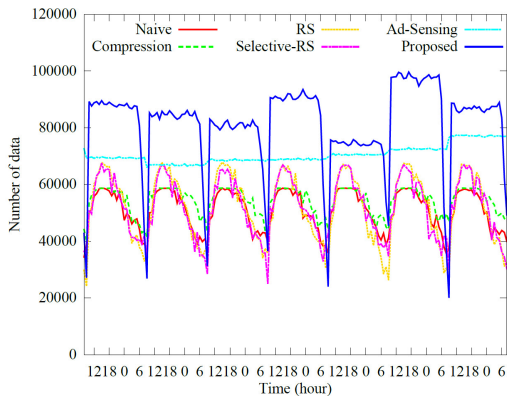


그림 6. 싱크 노드에서 수집된 데이터 수의 변화
Fig. 6. The number of data obtained by the sink node

언어진 데이터가 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이는 FEC의 디코딩 에너지를 고려하지 않았기 때문에 이로 인한 소모에너지 계산오차로 인한 것으로 판단된다.

그림 7은 노드 밀도에 따른 싱크에 도달하는 데이터 수의 변화를 보여준다. 제안된 기법을 제외한 다른 기법들은 밀도가 높을 때, 홉 수가 줄어서 중계 노드의 에너지 소모가 줄기 때문에 싱크 노드에서 얻는 데이터가 증가하지만, 일정 값 이상이 될 경우, 더 이상 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 수집되는 에너지가 남지만 이를 충분히 활용하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 반면, 제안된 기법은 남은 에너지를 충분히 활용하여 수집되는 데이터가 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 8은 태양 에너지 수집량에 따른 싱크 노드에 도달한 데이터의 수를 보여준다. 제안된 기법은 그림

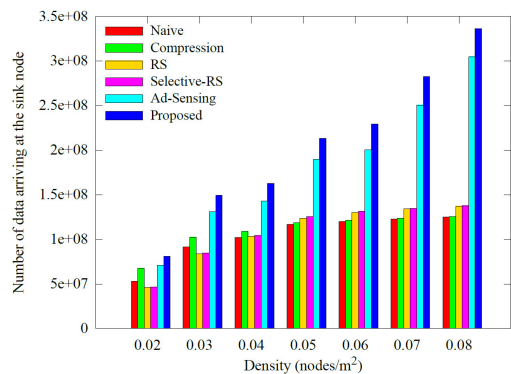


그림 7. 노드 밀도에 따른 싱크 노드의 수집 데이터 수 비교
Fig. 7. Change in the number of data arriving at the sink node with node density

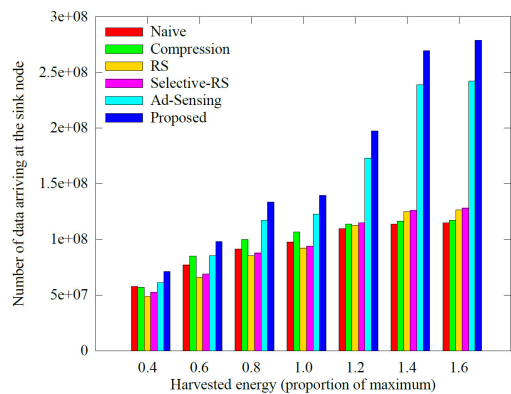


그림 8. 수집되는 에너지 변화에 따른 싱크 노드에 수집된 데이터 수 비교
Fig. 8. Change in the number of data arriving at the sink node according to the solar energy

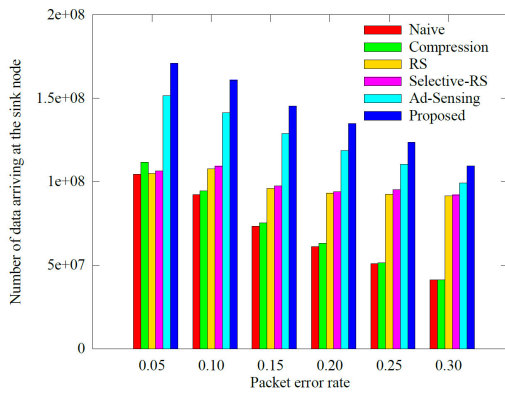


그림 9. 에러율의 변화에 따른 싱크 노드에 수집된 데이터 수 비교
 Fig. 9. Change in the number of data arriving at the sink node according to the packet error rate

9와 마찬가지로, 가용 에너지가 더 많을 때, 1 홉 노드는 더 많은 데이터를 전송할 수 있게 하기 때문에 더 많은 데이터를 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

그림 9는 패킷 오류율의 변화에 따른 싱크 노드에 도달한 데이터 수를 보여준다. 대체로 제안된 기법을 포함한 FEC를 사용한 기법들이 오류율의 증가에도 더 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이례적으로 Ad-Sensing은 FEC를 사용하지 않음에도 불구하고, 많은 데이터를 전송함으로써 비교적 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

V. 결론

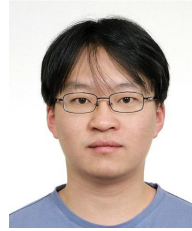
본 논문에서는 태양 에너지를 수집하는 WSN에서 주기적으로 데이터를 수집할 때, 남은 에너지로 압축과 FEC를 적용함으로써, 싱크 노드에서 수집되는 데이터양을 증가시키는 기법을 제안했다. 이 기법은 노드가 전송할 수 있는 데이터의 한계를 결정하고, 사용할 수 있는 에너지양과 소모되는 에너지를 계산하여 압축 혹은 FEC를 사용한다. 그 결과, 중계 노드에게 부담을 주지 않는 범위 내에서 싱크 노드에 도달하는 데이터의 양을 증가시켰다. 시뮬레이션을 통한 성능 측정 결과, 제안된 기법은 다른 비교군에 비해 여러 상황에서 싱크 노드에서 수집된 데이터의 양을 증가시킨 것을 확인할 수 있었다. 하지만 에너지 소모 오차로 인해 밤 기간 동안 정전 노드가 다수 발생하는 것을 볼 수 있었다. 향후, 이를 보완할 수 있는 더욱 정확한 소모 에너지 예측 기법이 고안되어야 할 것이다.

References

- [1] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Comput. Netw.*, vol. 52, no. 12, pp. 2292-2330, Aug. 2008.
- [2] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications," *Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 13, no. 3, pp. 443-461, Jul. 2011.
- [3] A. Kansal, D. Potter, and M. B. Srivastava, "Performance aware tasking for environmentally powered sensor networks," *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Rev.*, vol. 32, no. 1, pp. 223-234, Jun. 2004.
- [4] Y. Yang, L. Wang, D. K. Noh, H. K. Le, and T. F. Abdelzaher, "Solarstore: enhancing data reliability in solar-powered storage-centric sensor networks," in *Proc. 7th Int. Conf. Mob. Syst., Appl., Serv.*, pp. 333-346, Kraków, Poland, Jun. 2009.
- [5] T. Srisooksai, K. Keamarungsi, P. Lamsrichan, and K. Araki, "Practical data compression in wireless sensor networks: A survey," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 35, no. 1, pp. 37-59, Jan. 2012.
- [6] M. R. Islam, "Error correction codes in wireless sensor network: An energy aware approach," *Int. J. Comput. Inf. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 59-64, Jan. 2010.
- [7] I. Yoon, J. M. Yi, S. Jeong, and D. K. Noh, "Adaptive sensing and compression rate selection scheme for energy-harvesting wireless sensor networks," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 13, no. 6, doi:10.1177/1550147717713627, Jun. 2017.
- [8] J. Hong, J. Kwon, M. Kwon, and H. Park, "Compressed sensing based low power data transmission systems in mobile sensor networks," *J. KICS*, vol. 41, no. 11, pp. 1589-1597, Nov. 2016.
- [9] J. Jung, M. Kang, I. Yoon, and D. K. Noh, "Adaptive forward error correction scheme to improve data reliability in solar-powered wireless sensor networks," in *Proc. ICISS*, pp. 1-4, Pattaya, Thailand, Dec. 2016.

- [10] C. M. Sadler and M. Martonosi, "Data compression algorithms for energy-constrained devices in delay tolerant networks," in *Proc. 4th Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.*, pp. 265-278, Boulder, Colorado, Oct. 2006.
- [11] J. M. Yi, E. J. Oh, D. K. Noh, and I. Yoon, "Energy-aware data compression and transmission range control for energy-harvesting wireless sensor networks," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 13, no. 4, doi:10.1177/1550147717705785, Apr. 2017.
- [12] A. Cammarano, C. Petrioli, and D. Spenza, "Pro-energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks," in *Proc. MASS*, pp. 75-83, Las Vegas, NV, Oct. 2012.
- [13] D. K. Noh and K. Kang, "Balanced energy allocation scheme for a solar-powered sensor system and its effects on network-wide performance," *J. Comput. Syst. Sci.*, vol. 77, no. 5, pp. 917-932, Sept. 2011.
- [14] I. Yoon, "Sensing and compression rate selection with energy-allocation in solar-powered wireless sensor networks," *J. The Korea Soc. Comput. Inf.*, vol. 22, no. 5, pp. 81-88, May 2017.
- [15] M. Zuniga and B. Krishnamachari, "Analyzing the transitional region in low power wireless links," in *Proc. First Annu. IEEE Commun. Soc. Conf. Sensor Ad Hoc Commun. Netw.*, pp. 517-526, Santa Clara, CA, Oct. 2004.
- [16] J. M. Yi, M. J. Kang, and D. K. Noh, "Solar-castalia: solar energy harvesting wireless sensor network simulator," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 11, no. 2, pp. 1-10, Jan. 2015.
- [17] L. Biard and D. Nogu et, "Reed-solomon codes for low power communications," *JCM*, vol. 3, no. 2, pp. 13-21, Apr. 2008.

윤익준 (Ikjune Yoon)



2006년 2월 : 전북대학교 전자
정보공학부 졸업

2015년 8월 : 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 석·박사 졸업

2015년 8월~현재 : 숭실대학교
스마트시스템소프트웨어학과
조교수

<관심분야> 무선센서네트워크, 임베디드시스템, IoT