

Retransmission with Transmission Quantity Allocation for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

Gun-Hee Kim*, Ikjune Yoon**

*Student, Dept. of Computer Science, Kyonggi University, Gyeonggi-do, Korea

**Professor, Division of AI Computer Science and Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do, Korea

[Abstract]

In wireless sensor networks, batteries limit lifespan, and heavy data transmission around the sink causes the hotspot problem. To address this, data collection amounts are allocated to child nodes to limit transmission. However, this approach has issues with nodes far from the sink having excessive energy and failing to transmit the allocated amount due to data transmission errors. This paper proposes a method to prevent sensor data loss through error recovery via retransmission. The method ensures that each node's retransmission volume stays within its allocated data amount and energy limits, using excess energy for error recovery. Simulations show that this technique effectively recovers data transmission errors, collects data, minimizes energy depletion around the sink, and increases data collection rates.

▶ **Key words:** IoT, WSN, Transmission Allocation, Error Recovery, Retransmission

[요약]

무선 센서 네트워크에서는 배터리를 사용하여 수명이 제한적이고 싱크 주변에 데이터 전송이 많아 핫스팟 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 자식 노드에게 데이터 수집량을 할당하여 전송량을 제한하는 방법을 사용한다. 그러나 이 방법은 싱크 노드에서 먼 노드의 에너지 남는 문제와 데이터 전송 오류 시 할당된 양만큼 전송되지 않는 문제가 존재한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 부모 노드가 자식 노드에게 데이터 전송 양을 할당하여 전송량을 제한하는 환경에서, 재전송을 통한 오류 복구로 센서 데이터 손실을 방지하는 방법을 제안한다. 이때 각 센서 노드가 할당받은 데이터 전송량과 에너지의 한계를 넘지 않게 재전송량을 결정하고, 여분의 에너지로 오류를 복구하도록 한다. 시뮬레이션 결과, 제안된 기법이 데이터 전송 오류를 효과적으로 복구하여 데이터를 효율적으로 수집함을 확인했으며, 결과적으로 싱크 노드 및 주변 노드의 에너지 고갈을 최소화하고 데이터 수집률이 증가함을 알 수 있다.

▶ **주제어:** IoT, 무선센서네트워크, 전송량 할당, 오류복구, 재전송

• First Author: Gun-Hee Kim, Corresponding Author: Ikjune Yoon
*Gun-Hee Kim (11yell@kyonggi.ac.kr), Dept. of Computer Science, Kyonggi University
**Ikjune Yoon (ijyoon@kyonggi.ac.kr), Division of AI Computer Science and Engineering, Kyonggi University
• Received: 2024. 04. 30, Revised: 2024. 06. 18, Accepted: 2024. 06. 18.

I. Introduction

무선 센서 네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)는 재난 발생, 접근이 어려운 장소, 광범위한 장소에서 데이터를 수집하는 데 사용된다[1]. 이러한 기술은 주로 센서 노드는 배터리를 이용해 동작하지만, 에너지 고갈 시 교체나 재충전이 필요하고, 어려운 경우 센서의 수명이 제한된다. 센서의 배터리 수명 문제를 해결하기 위해 다양한 연구들이 진행되었으며 그중 한 가지 방법으로 에너지를 수집하는 노드를 사용하는 방법이 제시되었다[2].

에너지 수집은 태양열, 풍력과 같은 주변 에너지를 에너지원으로 활용하는 방안으로 이 중 에너지 밀도가 가장 높은 태양 에너지 이용 방법이 많이 사용된다[3]. 태양 에너지는 주기적이고 예상할 수 있으나, 밤에는 수집되지 않아 24시간 일정하게 동작해야 하는 응용에 사용이 어렵다. 이를 극복하기 위해 에너지 수집량을 예측해 시간별로 사용량을 결정하는 에너지 할당 방법이 사용되고 있다[4].

무선 센서 네트워크의 또 다른 문제점은 데이터 전송 시 센서가 데이터를 모아 외부로 전달해주는 싱크 노드에 가까울수록 수집된 데이터가 물리는 핫스팟 현상이 발생해 싱크 노드 및 그 주변 노드에 에너지 부족 문제가 발생하는 것이다[5]. 이를 완화하기 위해 자식 노드에게 데이터 수집량을 할당해 전송량을 제한하는 방법을 사용할 수 있다[6]. 이러한 방법은 싱크 노드에 먼 노드의 에너지가 남는 문제와 데이터 전송 오류 발생 시 할당된 양만큼 전송되지 않는 문제가 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 오류를 복구하여 할당된 양만큼 전송하게 할 수 있다.

본 논문에서는 위와 같은 무선 센서 네트워크의 싱크 노드와 그 주변 노드의 수명을 증가시키고 데이터 손실 문제를 해결하기 위해, 부모 노드가 자식 노드에게 데이터 전송량을 할당해 전송량을 제한하는 환경에서, 재전송을 통해 오류를 복구하고 데이터 손실을 막는 방법을 제안한다. 각 센서 노드는 할당된 전송량과 에너지 한계를 넘지 않게 재전송량을 결정하며, 여분의 에너지로 오류를 복구하여 센서의 정전 발생과 데이터 손실 및 오류율을 줄인다.

본 논문에서는 다음과 같이 구성된다. II장에서는 관련 연구를 소개하며 III장에서는 제안된 계획의 세부적인 사항을 나타낸다. IV장에서는 제안된 기법의 성능 평가 실험 결과를 제시하고 마지막으로 V장에서는 결론을 제시한다.

II. Related works

에너지 수집은 무선 센서 네트워크의 수명 문제를 해결하기 위한 기술이다. 현재 많은 연구자가 이 기술을 사용하여 어려움을 낮추는 연구를 수행하고 있다[7, 8].

앞에서 언급했듯이 태양 에너지는 에너지 수집의 에너지원 중 하나로 에너지 수집률이 가장 높아 많은 연구에 사용된다. [9]은 오류율을 줄이기 위해 FEC(Forward Error Correction)를 사용해 데이터 손실률과 에너지의 trade-off를 이용하는 에너지 적응형 Reed-Solomon 기법을 제안했다. 이 기법은 소비 에너지와 태양 에너지의 수집을 고려해 에너지 문턱값을 계산하고 배터리 잔여 에너지를 고려해 동작한다. 노드는 추가 정전 시간 없이 데이터 손실률을 감소시키는 장점이 있지만, 이 방법은 에너지 문턱값에 의해 패리티 길이에 따라 수집 가능 데이터의 양에 제한이 생기는 문제점이 존재한다.

[10]의 연구에서는 에너지 수집형 노드에서 에너지 소비를 분산하는 오류 제어 방식을 고려하여 협력 ARQ(C-ARQ)를 사용하여 에너지 수확 무선 센서 네트워크의 신뢰성과 에너지 관리를 개선하는 솔루션을 제안하였다. 이러한 방식은 재전송을 위해 협력 노드를 사용하여 에너지 소비가 감소한다. 또한, 협력 노드의 위치가 출발지와 목적지 사이에 존재하여 오류 확률이 감소하고 따라서 신뢰성이 향상된다는 장점이 있다.

[11]은 태양광 전력 무선 센서 네트워크에서 더욱 안정적인 통신을 제공할 수 있는 효율적인 FEC(순방향 오류 정정) 방식을 제안한다. 이 방법은 주기적으로 수집된 에너지를 효율적으로 사용하는 것을 목표로 하며 효과적으로 노드의 정전을 방지하고 더 많은 데이터를 수집하며 오류 복구율을 향상시킨다는 장점이 있다.

[12]은 정전 시간을 증가시키지 않고 잉여 에너지를 사용하여 무선 센서 네트워크의 신뢰성을 높이기 위한 현지화된 방법인 EA-RS(Energy-Aware Reed-Solomon)를 제안했다. EA-RS 방법은 RS 방법을 기반으로 다음 주기에 소스 노드와 대상 노드 모두의 주어진 에너지 예산에 따라 FEC의 패리티 길이를 적응적으로 조정하는 방법이다. 이러한 방법은 정전 시간에 악영향을 미치지 않으면서 오류 복구율을 최대한 높일 수 있다. 시뮬레이션 결과 제안된 방식이 이전 방식보다 각 환경에 대해 전체 네트워크에서 수집되는 데이터의 양을 증가시킨다는 장점이 있다.

[13]은 종단 간 패킷 전달 확률을 극대화하고 네트워크 수명에 영향을 미치지 않도록 네트워크의 각 데이터 링크의 중복 수준을 동적으로 조정하는 SolarCode를 제시하

였다. 이 기법은 잉여 에너지를 성공적으로 활용하고 데이터 전달 신뢰성을 높임을 보여주었다.

[14]는 무선 센서 네트워크에서 높은 신뢰성과 낮은 지연 시간을 동시에 제공하기 위한 적응형 중복 기반 메커니즘을 제안한다. 기존 재전송 방식은 멀티홉 환경에서 지연 시간이 크게 증가하는 문제가 있었으나, 제안된 메커니즘은 상위 노드의 링크 상태와 지연 요구사항을 확인해 패킷 중복 전송 여부를 결정한다. 실험 결과, 제안된 방식은 높은 패킷 전달률과 낮은 지연 시간을 제공하며, 홉 수가 증가해도 일정한 오버헤드를 유지해 확장성이 뛰어난 확인했다. 그러나 [14]은 에너지 하베스팅을 사용하지 않고 전송 성공률을 높이고 최대 데이터 수집을 목표로 하는 우리 방식과는 달리 빠른 데이터 수집을 위한 방법이다.

이러한 방법들은 데이터 전송량을 계산해 자식 노드에 할당하지 않거나 재전송 시 에너지 한계 발생으로 발생하는 정전 문제 해결을 위한 한계값을 계산하지 않는다. 본 논문에서 무선 센서 네트워크의 싱크 노드와 주변 노드의 수명을 연장하고 데이터 손실을 줄이기 위해, 부모 노드가 자식 노드에게 데이터 전송량을 할당하는 환경에서 재전송을 통한 오류 복구 방법을 제안한다. 각 센서 노드는 부모 노드를 통해 계산한 전송량과 사용 가능한 에너지를 고려해 재전송을 결정하고, 재전송을 활용해 오류를 복구하여 정전 발생과 데이터 손실을 최소화한다. 이를 통해 전송 성공률을 높이고 최대 데이터의 양을 수집할 수 있다.

III. The Proposed Scheme

제안된 기법은 데이터 전송량 할당과 오류 복구를 통해 센서 노드의 수명을 증가시키고 데이터 전송 성공률을 높이는 것을 목표로 한다. 이를 위해 센서 노드의 에너지 소비량과 수집량을 예측해 사용 가능 에너지량을 구하고, 이 에너지로 전송 가능 데이터의 양을 계산하여 부모 노드에게 전달한다. 부모 노드는 자신과 자식 노드의 전송할 수 있는 양을 바탕으로 자식 노드에게 받을 수 있는 데이터양을 계산해 자식 노드에게 전달함으로써 일정 주기로 설정된 라운드에 전송할 수 있는 데이터양을 할당한다. 자식 노드는 이 할당받은 데이터양만큼 전송하는데, 전송 오류로 인해 부모 노드에게 ACK를 받지 못하면 남은 에너지 범위 내에 재전송하여 오류를 복구하여 데이터 손실을 막는다. 그림1은 제안된 방식의 전체적인 개요를 나타낸다.

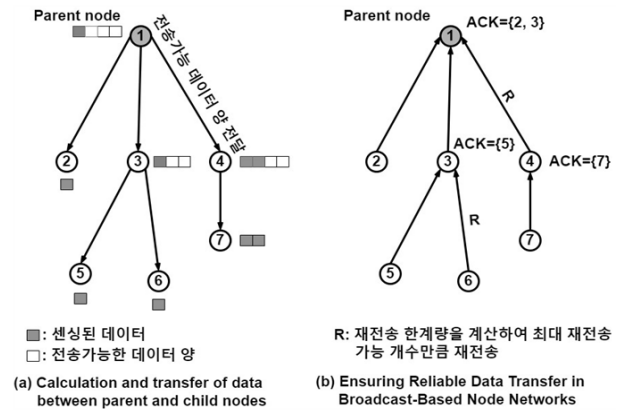


Fig. 1. Overview of the proposed scheme

1. Sensor node energy model

제안된 기법의 센서 노드는 태양 에너지를 수집해 에너지원으로 사용한다. 하지만 수집된 에너지 양은 시간과 날씨에 따라 크게 변화한다. 센서의 일정한 동작을 위해 에너지를 효율적으로 관리해야 한다. [15]에서는 태양 에너지를 시간에 관계 없이 일정하게 사용하기 위해 시간 슬롯을 기준으로 가용 에너지를 할당하는 에너지 할당 방식이 사용됐다. 센서 노드가 계속해서 작동하기 위해 소모 에너지 e_c 가 할당된 에너지 e_{avail} 보다 작거나 같아야 한다. 즉,

$$e_{avail} \geq e_c \quad (1)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, e_c 는 데이터 전송 에너지 e_{Tx} , 데이터 수신 에너지 e_{Rx} , 그 외의 작업에 소모되는 에너지 e_{idle} 로 구성된다. 이를 식 (1)에 대입하면,

$$e_{avail} \geq e_{Tx} + e_{Rx} + e_{idle} \quad (2)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 이때 e_{Rx} 와 e_{idle} 의 값은 비교적 일정하며 e_{Tx} 는 데이터 전송량과 전송 거리 등에 따라 변동되며,

$$e_{Tx} = s\beta r^\alpha \quad (3)$$

과 같이 나타낼 수 있다[16]. 여기서 s 는 전송을 위한 데이터의 크기(bit)를 나타내며, β 는 거리에 따른 바이트당 전송에 필요한 에너지 소비량(J/bit/m ^{α}), r 은 전송 거리, α 는 경로 손실 지수(2-5)를 나타낸다. 경로손실이란 전자 기파가 공간을 통해 전파될 때 전력 밀도감 감소하는 것을

의미한대[17]. 이를 이용하여 센서 노드가 자신과 자식 노드의 데이터를 모아 총 s_{aggr} 크기의 전송할 때, 노드가 전송할 수 있는 최대 데이터 크기 e_{Tx} 는

$$e_{Tx} = \left(\left[\frac{s_{aggr}}{s_{max}} \right] s_{head} + s_{aggr} \right) \beta r^\alpha \quad (4)$$

로 구할 수 있다[15]. 여기서, s_{max} 는 패킷의 최대 페이로드 크기, s_{head} 는 헤더의 크기이다.

2. Data allocation

센서 노드는 에너지가 제한됨으로 자식 노드가 데이터를 많이 전송하면 이를 중계하는 부모 노드의 에너지가 고갈될 수 있다. 따라서 본 기법에서는 자식 노드가 사용 가능한 에너지의 양과 이를 이용하여 전송 가능한 데이터 전송량을 계산하여 부모 노드에 전달하고 부모 노드는 모든 자식 노드의 전송 가능량을 고려하여 자식 노드가 공평하게 전송할 수 있는 데이터양을 계산하여 각 자식 노드에게 전달하여 할당한다. 이러한 방법은 부모 노드의 에너지 고갈 없이 에너지를 한계까지 사용하여 가장 많은 데이터 수집이 가능한 방법으로, 이 과정을 거친 후 자식 노드는 다시 자신의 데이터 전송량과 센싱 주기를 결정한다[15, 18].

이전 논문에서 제한된 에너지에서 노드 i 가 자신과 자식 노드들의 데이터를 모아 전송하는 데이터 총량 s_{aggr_i} 는

$$s_{aggr_i} \approx |T_i| s_{sense} \quad (5)$$

과 같이 표현했다[15]. $|T_i|$ 는 자신을 포함한 자식 노드의 수이며 s_{sense} 는 노드 하나가 보낼 수 있는 데이터의 양이다. 따라서 각각의 데이터가 루트 노드에 개별적으로 전송되는 경우를 나타내기 위해 노드 하나가 보낼 수 있는 데이터의 양 s_{sense} 는 다음과 같다.

$$s_{sense} \leq \frac{e_{avail} - e_{Rx} - e_{idle}}{|T_i| \beta r^\alpha} \quad (6)$$

전체 네트워크에서 고른 데이터 수집을 위해 제한된 양의 데이터를 자식 노드와 공유하고 동일한 데이터의 양이 수집되도록 한다. 노드 i 와 그 자식 노드에서 감지할 수 있는 데이터의 양 s_{sense_i} 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

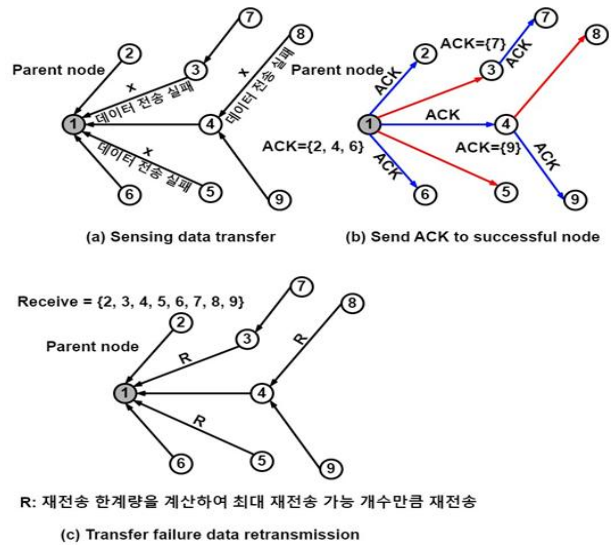


Fig. 2. Process of the proposed method

$$s_{sense_i} = \frac{s_{aggr_i}}{|T_i|} \quad (7)$$

본 기법에서는 각 노드가 s_{aggr_i} 과 s_{sense_i} 를 계산하고, 데이터 할당 기법[15]로 자식 노드에게 수집할 데이터양을 전달하는 방법을 사용하고 자식 노드는 자기 자신의 전송량을 계산하여 센싱 주기를 결정한다. 센싱 주기 p_{sense} 는

$$p_{sense} = p_{round} \frac{s_{unit}}{s_{sense}} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있고, 이때 p_{round} 는 한 라운드의 주기를 나타내며 s_{unit} 은 한 번에 감지되는 데이터의 양을 가리킨다.

3. Retransmission limit

각 노드는 센싱 된 데이터를 부모 노드에게 전송하고, 전송이 성공하면 ACK 메시지를 받는다. 이때, 부모 노드는 브로드캐스트 전송 방식으로 모든 자식 노드에게 ACK 메시지를 전달하고, 자식 노드는 ACK 메시지에 자신이 보낸 메시지 ID가 있는지 확인함으로써 자신의 메시지가 성공적으로 전송됐는지 판단한다. 만약 자신이 보낸 메시지에 대한 ACK를 받지 못하면, 이를 재전송해야 한다. 본 기법에서 센서 노드는 남은 에너지로만 재전송을 할 수 있도록 재전송 한계량을 계산해야 한다.

센서 노드가 한 라운드 동안 사용한 에너지 e_{used} 와 할당된 에너지 e_{avail} 를 고려하여 한 라운드 동안 남은 에너

지 e_{extra} 를 구하면

$$e_{extra} = e_{avail} - e_{used} \quad (9)$$

가 된다. 여기서 e_{used} 는 s_{sense} 과 p_{sense} 를 수식 (2), (3)에 대입하여 구할 수 있다. 이 e_{extra} 를 식 (3)에 대입하여 재 전송 가능 데이터양 s 를 구하면

$$\frac{e_{extra}}{\beta r^\alpha} = s \quad (10)$$

가 된다. 1번 센싱해 얻는 데이터 크기가 s_{unit} 일 때, s 만큼 데이터 전송 가능하면 최대 전송 가능 데이터 수 s_{ret} 는

$$s_{ret} = \left\lfloor \frac{s}{s_{unit}} \right\rfloor \quad (11)$$

로 구할 수 있다. 센서 노드는 전송 오류 발생 시 s_{ret} 개까지의 데이터를 중복 전송해 네트워크 수명에 주는 영향을 최소화하는 동시 오류 복구가 가능하다. 이를 통해 할당된 에너지 범위 내에 재전송하여 오류율을 낮출 수 있다.

본 논문에서 제시한 기법을 적용한 예는 그림 2와 같다. 전체적인 과정은 (a) 자식 노드는 부모 노드에게 센싱된 데이터를 전송하며 자식 노드 2, 4, 6은 전송에 성공하지만 3, 5는 전송에 실패한다. (b) 부모 노드는 전송 성공한 메시지 목록을 ACK 메시지에 포함하여 자식 노드에게 브로드캐스트 한다. 2, 4, 6번에 대한 ACK 메시지를 받지만 3, 5번에 대한 ACK 메시지를 받지 못한다. (c) ACK 메시지를 받지 못한 노드가 재전송 한계량을 계산 후 재전송한다. 3, 5번 노드가 재전송 한계량을 계산하여 부모 노드 1에게 데이터를 재전송한다. 재전송 성공 시 부모 노드는 자신이 받기로 했던 데이터를 성공적으로 받을 수 있다.

제안된 기법을 적용하면 각 노드가 자신의 데이터 재전송 한계량 내에서 재전송하여 부모 노드에게 추가 부하를 주지 않고, 자신의 에너지를 고갈시키지 않는 범위 내에서 계획된 데이터만큼 수집될 수 있다. 그로 인해 싱크 노드와 그 주변 노드의 정전 발생률을 줄이고 데이터의 손실 및 오류율을 줄인다. 아래의 알고리즘 1은 위의 전체 과정에 대한 알고리즘을 나타낸 것이다.

Algorithm 1 Process of the proposed method

```

1:  $s_{aggr} \leftarrow (3), (4)$ 
2: Send  $s_{aggr}$  to the parent node.
3:  $s_{sense_i} \leftarrow (6), (7)$ 
4: Parent node allocates data transfer to child node.
5: Transfer data.
6: If successful data transfer, ACK message to child node.
7: if ACK message is not received then
8:    $s_{ret} \leftarrow (9), (10), (11)$ 
9:   Retransmit as much as  $s_{ret}$ .
10: end if
  
```

Table 3. Simulation parameters.

Parameters	Values
n	1000
Duration of a round	1 h
Transmission period	1 min
Transmission range	10 m
Transmission rate	250 kbps
Sensor battery capacity	110 mAh
Sensor initial energy	55 mAh
α	4
β	100 pJ/bit/m ^a
e_{Rx}	48 mJ
e_{idle}	8 μ J
error rate	0.2

IV. Performance Evaluation

1. Experimental environment

이 절에서는 실험을 통해 본 논문에서 제안된 기법의 성능을 평가한다. 이를 위해 (1) Data Allocation 기법 [15], (2) Data Allocation에 일반적인 ARQ를 추가한 기법 (ARQ), (3) 에러가 없이 모든 전송이 성공하는 이상적인 환경의 Data Allocation 기법(No error), (4) 제안된 기법 (Proposed)의 성능을 비교하였다. 이 실험에서는 태양 에너지 수확 무선 센서 네트워크를 시뮬레이션하기 위해 설계된 시뮬레이터인 SolarCastalia[19]를 사용하였으며 실험은 50회 반복하였고 이 결과의 평균값을 사용하였다. 표 3은 실험에서 사용된 주요 파라미터들을 보여준다.

2. Experimental results

2.1 Evaluation according to the number of sensor nodes

본 실험에서는 센서 노드 수 변화에 따른 수집 데이터양을 비교한다. 그림 3은 각각의 기법들을 적용하여 실제 싱크 노드가 받은 데이터양의 비교를 보여주며, 그림 4는 센서 노드가 센싱한 데이터의 양을 보여준다. 그림 3에서



Fig. 3. Comparative Analysis of Data Received by Sync Nodes in Response to Changes in Sensor Node Count



Fig. 4. Comparative Analysis of Sensor Data Quantity Sensing with Varying Sensor Node Counts



Fig. 5. Comparative Analysis of Data Quantity Received by Sync Nodes with Changes in Error Rates



Fig. 6. Comparative Analysis of Sensor Data Quantity Sensing with Varied Error Rates

No error, 제안한 기법, ARQ, Data Allocation 순으로 싱크 노드가 데이터를 많이 받았음을 알 수 있다. Data allocation과 ARQ 기법은 센서 노드 수가 증가함에 따라 데이터 수집량이 줄어드는데, 긴 전송경로로 인해 전송 오류가 더 커지기 때문이다. 반면 제안된 기법은 노드 수가 많아져도 비교적 일정한 수집량을 보이는 것을 볼 수 있는데, 전송 오류를 효과적으로 복구했기 때문이다. 그림 4의 센싱된 데이터 대비 싱크 노드에 도달한 비율은 전송 성공률은 평균적으로 Data Allocation 41%, ARQ 51%, 제안한 기법 87%로, 다른 두 기법이 센서 노드 수가 증가함에 따라 센싱된 데이터는 증가하고, 수집된 데이터는 감소하는 것을 볼 수 있는데 센서 노드 수가 증가하면 오류로 부모 노드에 도달하는 데이터 수가 감소하여 싱크 주변 노드들의 전송량이 감소하여 더 많은 데이터 수집량을 자식 노

드에게 할당했기 때문이다. 하지만 오류 발생도 증가하여 그림 3의 데이터 수집량까지 증가시키지는 못한 것을 알 수 있다. 반면 제안된 기법은 데이터 센싱량을 효율적으로 조절하고, 오류를 성공적으로 복구한 것을 알 수 있다.

2.2 Evaluation according to error rate

본 실험에서는 패킷 오류율 변화에 따른 성능을 비교한다. 이 중, No error 기법은 오류율이 언제나 0이므로 오류율의 변화와 관계없이 언제나 일정하다. 그림 5는 패킷 오류율 변화에 싱크 노드가 받은 데이터양의 변화를 보여 주고, 그림 6은 센서 노드가 센싱한 데이터의 양의 변화를 보여준다. Data allocation 기법과 ARQ 기법은 오류율이 증가함에 따라 더 많은 데이터를 센싱 했는데, 이는 2.1에서 언급한 바와 같이 오류 증가 시 싱크 주변 노드에 도달

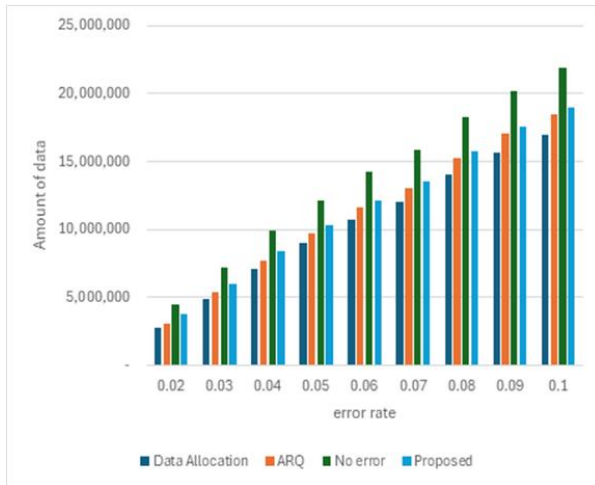


Fig. 7. Comparative Analysis of Data Quantity Received by Sync Nodes Based on Node Density



Fig. 8. Comparative Analysis of Sensor Data Quantity Sensing Based on Node Density

하는 데이터가 적어져 이들이 전송할 데이터가 줄어서 남는 에너지가 발생하고, 이로 인해 더 많은 데이터 수집량을 자식 노드에게 할당했기 때문이다. 하지만 잦은 오류로 이 데이터들이 싱크 노드에 도달하는 비율은 10% 이하까지 내려간다. 반면, 제안된 기법은 오류율의 변화와 관계없이 비교적 일정한 양의 데이터를 센싱하고, 이들이 싱크 노드에 도달하는 양이 약 76%에서 90% 정도로 좋은 성능을 보인다. 결과적으로 제안된 기법이 오류가 증가해도 남는 에너지를 활용해 오류를 잘 복구함을 확인할 수 있다.

2.3 Evaluation according to node density

본 실험에서는 노드 밀도에 따른 수집 데이터양을 비교한다. 그림 7는 각각의 기법들을 적용하여 실제 싱크 노드가 받은 데이터양의 비교를 보여주며 그림 8은 각각의 기법들의 센서 노드가 센싱한 데이터의 양을 보여준다. 노드 밀도가 낮을 경우, 개별 노드가 싱크 노드에 데이터를 전송하기 위해 더 많은 중간 노드를 거쳐야 한다. 이는 전송 거리가 늘어나고 각 노드 사이의 전송 홉 수가 증가함을 의미한다. 따라서 전송 홉 수가 많아질수록 각 홉에서의 데이터 전송량이 누적되어 증가하고, 전송 과정에서 발생 가능한 오류의 가능성도 높아진다. 전체적으로 밀도 증가 시 그림 7과 같이 수집량이 증가하며 전송 홉 수가 줄어들 시 에너지 소모가 줄기 때문에 그림 8처럼 센싱 양도 증가하는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 제안된 기법은 다른 기법에 비해 더 적게 센싱하고 이를 효율적으로 전송하여 약 87%의 데이터를 수집해 다른 기법에 비해 더 많은 데이터를 수집한 것을 볼 수 있다. 결과적으로 제안된 방식이 밀도와 관계없이 좋은 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

V. Conclusion

본 논문에서 에너지 수집형 무선 센서 네트워크의 데이터 손실 문제 해결을 위해 남는 에너지로 오류가 발생한 데이터를 재전송하는 기법을 제안했다. 제안된 방식은 자식 노드가 전송 가능한 데이터의 양을 계산하고 부모 노드에게 전달하여 전송 가능 데이터를 계산하고 계산된 전송 가능 데이터를 부모 노드가 자식 노드에게 할당해 데이터 전송을 한다. 데이터 전송 후 ACK 메시지를 받지 못한 노드의 데이터를 에너지 여유량만큼 재전송해 오류 난 데이터를 복구한다. 결과적으로 데이터 수집량 할당으로 싱크 노드 및 그 주변 노드의 에너지 고갈을 최소화하고 남는 에너지로 오류를 복구해 데이터 수집률을 증가시킨다. 시뮬레이션 결과, 제안된 기법이 여러 상황에서 데이터 전송 오류를 효과적으로 복구하여 데이터를 효율적으로 수집하는 것을 확인했다. 향후, 무선 전력 전송을 활용한 무선 센서 네트워크에 적용하는 방법을 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Kyonggi University's Graduate Research Assistantship 2024.

REFERENCES

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer networks*, vol.

- 38, no. 4, pp. 393-422, 2002. 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [2] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications," *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, vol. 13, no. 3, pp. 443-461, 2011. 10.1109/SURV.2011.060710.00094
- [3] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, and M. Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems," in *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*. IEEE Press, p. 64, 2005. 10.1109/IPS.N.2005.1440973
- [4] D. K. Noh, 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, pp. 917-932, 2011. 10.1016/j.jcss.2010.08.008.
- [5] R. Balamurali, K. Kathiravan, and T. Krishnan, "Mitigating hotspot issue in wsn using sensor nodes with varying initial energy levels and quantization algorithm," *CYBERNETICS AND INFORMATION TECHNOLOGIES*, vol. 19, no. 3, pp. 118-136, 2019. <https://doi.org/10.2478/cait-2019-0029>
- [6] V. Sharma, U. Mukherji, V. Joseph, and S. Gupta, "Optimal energy management policies for energy harvesting sensor nodes," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 4, 2010. 10.1109/TWC.2010.04.080749
- [7] R. Kadel, K. Paudel, D. Guruge, and S. Halder, "Opportunities and Challenges for Error Control Schemes for Wireless Sensor Networks: A Review," *Electronics*, vol. 9, no. 4, P. 504, 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9030504>
- [8] L. Biard and D. Noguet, "Reed-solomon codes for low power communications." *JCM*, vol. 3, no. 2, pp. 13-21, 2008. 10.4304/jcm.3.2.13-21.
- [9] J. Jung, M. Kang, D. K. Noh, and S. H. Cho, "Energy-aware Reed-Solomon Scheme for Improving Data Reliability in Solar-powered Wireless Sensor Networks," *KIISE Transactions on Computing Practices*, Vol. 23, No. 2, pp. 122-127, 2017. 10.5626/KTCP.2017.23.2.122.
- [10] F. Jalali, S. Khodadoustan and A. Ejlali, "Error control schemes in solar energy harvesting wireless sensor networks," 2012 International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), pp. 979-984, 2012. 10.1109/ISCIT.2012.6381047.
- [11] G. G. Wook, M. Kang, Y. Kim, I. Yoon, and D. K. Noh, "Efficient FEC Scheme for Solar-Powered WSNs Considering Energy and Link-Quality," *Energies*, vol. 13, no. 15, pp. 3952-3961, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13153952>
- [12] M. Kang, D. K. Noh, and I. Yoon, "Energy-Aware Control of Error Correction Rate for Solar-Powered Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 18, no. 8, P. 2599, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18082599>.
- [13] Y. Yang, L. Su, Y. Gao and T. F. Abdelzaher, "SolarCode: Utilizing Erasure Codes for Reliable Data Delivery in Solar-powered Wireless Sensor Networks," 2010 Proceedings IEEE INFOCOM, San Diego, CA, USA, pp. 1-5, 2010. 10.1109/INFOCOM.2010.5462283.
- [14] C. Wu, S. Ohzahata and T. Kato, "An Adaptive Redundancy-Based Mechanism for Fast and Reliable Data Collection in WSNs," 2012 IEEE 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, Hangzhou, China, pp. 347-352, 2012. doi: 10.1109/DCOSS.2012.36.
- [15] I. Yoon, "Data Acquisition Control for UAV-Enabled Wireless Rechargeable Sensor Networks," *Sensors*, vol. 23, no. 7, P. 3582, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23073582>
- [16] T. Melodia, D. Pompili, I. Akyildiz, "Optimal local topology knowledge for energy efficient geographical routing in sensor networks," *IEEE INFOCOM*, vol. 3, pp. 1705-1716, 2004. 10.1109/INFOCOM.2004.1354582
- [17] K. Doddapaneni, E. Ever, O. Gemikonakli, I. Malavolta, L. Mostarda and H. Muccini, "Path Loss Effect on Energy Consumption in a WSN," 2012 UKSim 14th International Conference on Computer Modelling and Simulation, Cambridge, UK, pp. 569-574, 2012.
- [18] H. Jeong, J. Kim, and Y. Yoo, "Adaptive Broadcasting Method Using Neighbor Type Information in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 11, no. 6, pp. 5952-5967, 2011. <https://doi.org/10.3390/s110605952>
- [19] J. Yi, M. Kang and D. Noh, "SolarCastalia – Solar energy harvesting wireless sensor network simulator," 2014 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Busan, Korea (South), pp. 1-2, 2014. doi: 10.1109/ICTC.2014.6983072.

Authors



Gun-Hee Kim received the B.S. degree in Computer Science and Engineering from Kyonggi University, Korea, in 2024. Kim is a master's student in the Department of Computer Science at Kyonggi University in Gyeonggi-do,

South Korea, in 2024. She is interested in AI, IoT, and wireless sensor networks.



Ikjune Yoon received the B.S. degree in Computer engineering from Jeonbuk National University, Korea, in 2005, and Ph.D. degree in Computer Science and Engineering from Seoul National University, Korea, in 2015.

He is currently an assistant professor in Division of AI Computer Science and Engineering at Kyonggi University. His research interests include cyber-physical systems and internet of things.