

## An Energy-Efficient Data Collection Method for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks Using Hybrid LoRa and BLE

Ikjune Yoon\*, Dong Kun Noh\*\*

\*Assistant Professor, Division of AI Computer Science and Engineering, Kyonggi University, Suwon-si, Korea

\*\*Professor, School of AI Convergence, Soongsil University, Seoul, Korea

### [Abstract]

This paper proposes a method that maximizes data collection in wireless sensor networks where energy harvesting sensor nodes periodically collect environmental data and occasionally transmit urgent data to a sink node, using two transmission techniques. The proposed method utilizes both LoRa (Low Range Radio) and BLE (Bluetooth Low Energy) technologies: small periodic sensing data is transmitted using LoRa in a single-hop manner to enhance energy efficiency, while large-volume urgent data is quickly transmitted using BLE in a multi-hop manner. Sensor nodes reserve energy for urgent data transmission based on their energy status, using the remaining energy to determine the optimal sensing interval, thus improving energy efficiency. Experimental results show that the proposed method enables stable transmission of urgent data through efficient energy use, increasing the amount of sensing data collected while preventing energy depletion in sensor nodes.

▶ **Key words:** Wireless sensor network, energy harvesting, dual transmission, urgent data, energy efficiency

### [요 약]

본 논문에서는 에너지를 수집하여 사용하는 센서 노드가 주기적으로 환경 데이터를 수집하고, 간헐적으로 발생하는 긴급 데이터를 싱크 노드에 전송하는 무선 센서 네트워크에서, 두 가지 전송 기법을 활용하여 데이터 수집량을 최대화하는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 LoRa(Low Range Radio)과 BLE(Bluetooth Low Energy)의 두 기술을 활용하여, 주기적인 소량의 센싱 데이터는 LoRa을 통해 1홉으로 전송하여 에너지 효율을 높이고, 대용량의 긴급 데이터는 BLE를 이용한 멀티홉 방식으로 신속하게 전송한다. 또한, 센서 노드는 에너지 상황에 따라 긴급 데이터 전송을 위한 에너지를 예비로 남기고, 나머지 에너지를 활용하여 최적의 센싱 주기를 결정함으로써 에너지 효율을 증가시켰다. 실험 결과, 제안된 기법은 에너지의 효율적 활용을 통해 긴급 데이터를 안정적으로 전송하고, 센서 노드의 에너지 고갈을 방지하면서도 센싱 데이터 수집량을 증가시키는 것을 확인했다.

▶ **주제어:** 무선 센서 네트워크, 에너지 수집, 듀얼 전송, 긴급 데이터, 에너지 효율

- 
- First Author: Ikjune Yoon, Corresponding Author: Dong Kun Noh
  - \*Ikjune Yoon (ijyoon@kyonggi.ac.kr), Division of AI Computer Science and Engineering, Kyonggi University
  - \*\*Dong Kun Noh (dnoh@ssu.ac.kr), School of AI Convergence, Soongsil University
  - Received: 2024. 11. 04, Revised: 2024. 11. 22, Accepted: 2024. 11. 27.

## I. Introduction

무선 센서 네트워크는 주변 환경 데이터를 대량으로 수집하기 위해 사용된다. 여기서 사용된 센서 노드는 배터리로 동작하는 소형 무선 기기로, 배터리로 동작하므로 수명이 제한적이고, 배터리가 전부 소모되면 새 기기로 교체해야 하는 단점이 있다. 따라서 기존에는 배터리의 소모를 줄여서 네트워크의 수명을 증가시키는 연구가 수행됐다 [1,2].

무선 센서 노드의 배터리 문제를 극복하기 위한 한 방법으로 주변 환경으로부터 에너지를 수집하는 에너지 수집 기법이 활용된다. 에너지 수집 기법은 배터리의 한계를 극복하여 센서 노드의 수명을 반영구적으로 증가시킬 수 있다. 이로 인해 기존의 배터리의 한계 문제는 극복했지만, 반대로 남은 에너지가 배터리 충전 한계를 넘어서 저장되지 못해서 사라지는 문제가 발생하여, 이를 활용하여 네트워크의 성능을 증가시키는 연구가 진행되어 왔다[3,4]. 특히, 주기적으로 환경 데이터를 수집하는 응용에서는 에너지가 남으면 센싱 주기를 조절하여 더 자주 센싱함으로써 데이터의 정밀도를 높이는 기법이 연구되었다[5].

기존의 무선 센서 네트워크는 ZigBee나 BLE(Bluetooth Low Energy)와 같은 LPWPAN(Low Power Wireless Personal Area Network) 통신 기술을 사용하여 멀티 홉으로 센싱 데이터를 싱크 노드에 전송했다. 이러한 방식은 네트워크 규모가 커지면 홉 수가 증가하여 중계 노드의 에너지가 급격히 감소하는 문제가 있다. 이를 극복하기 위해서 저전력 장거리 통신 기술인 LoRa(Low Range Radio)나 SigFox같은 LPWAN(Low Power Wide Area Network) 통신 기술을 활용하는 연구가 진행되고 있는데, 이들 LPWAN은 전송률이 매우 낮고, 전송 지연 시간이 매우 긴 대신 수 km의 전송 거리를 가지고 있어서 1홉으로 데이터를 싱크 노드에 전송할 수 있다. 이는 주기적으로 수집된 소량의 센싱 데이터를 전송하는데 적합하지만, 침입 감시 CCTV영상과 같이 대용량 데이터를 긴급히 전송해야 하는 경우에는 적합하지 않다. 따라서 최근에는 LPWPAN과 LPWAN 두 기술을 동시에 활용하는 기법들이 연구되고 있다[6-8].

주변 환경 데이터를 수집하는 응용에서는 주기적으로 센싱 데이터를 수집하는 동시에 화재나 침입자 같은 긴급 이벤트가 발생할 수 있다. 이들 정보를 효율적으로 전송하기 위해, 주기적인 환경 데이터는 기존의 센싱 주기 조절 방식[9]을 적용할 수 있지만, 이것만 적용하면 주기적인 데이터 수집에 모든 에너지를 소모하여 긴급 상황 발생 시

에너지 고갈로 데이터를 전송할 수 없을 수 있다. 따라서 이러한 응용에서는 데이터를 추가로 전송하기 위한 예비 에너지가 필요하다.

본 논문에서는 주변 환경으로부터 에너지를 수집하여 사용하는 센서 노드가 주기적으로 환경 데이터를 수집하는 동시에 간헐적으로 발생하는 대량의 긴급 데이터를 싱크 노드에 전송하는 무선 센서 네트워크에서, 센서 노드의 배터리 충전 한계를 넘는, 여분의 수집된 에너지를 활용하여 데이터 수집량을 증가시키는 기법을 제안한다. 여기서 센서 노드는 LoRa과 BLE의 두 가지 통신 기술을 사용하는데, 주기적으로 전송하는 작은 센싱 데이터는 LoRa를 통해 1홉으로 싱크 노드에 전송하여 에너지 효율을 높이고, 대용량의 긴급 메시지는 지연 시간을 감소시키기 위해 BLE를 이용하여 멀티홉으로 싱크 노드에 전송한다. 센서 노드는 긴급 데이터 전송을 위한 에너지를 예비로 남기고, 자신의 에너지가 고갈되거나 과충전 되지 않는 범위 내에서 센싱 데이터 수집량을 최대화 할 수 있는 센싱 주기를 결정한다. 만약 긴급 데이터가 발생하면 비축해둔 에너지를 활용하여 긴급 데이터를 전송하고 추가로 소모된 에너지를 다시 비축하기 위해 센싱 주기를 조절한다. 이를 통해 센서 노드는 긴급 데이터를 효율적으로 전송하는 동시에 센싱 데이터 수집량을 최대화한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 제안 기법과 관련된 연구를 설명하고, 3장에서는 저자가 제안하는 LoRa와 BLE로 각각 일반 데이터와 긴급 센서 데이터를 전송하는 데이터 수집 기법을 소개한다. 특히, 시스템의 진행 과정, 센싱 주기 결정, 그리고 긴급 데이터 처리 방법을 자세히 다룬다. 4장에서는 제안된 기법의 성능을 평가한 결과를 보여주고 마무리한다.

## II. Related Work

무선 센서 네트워크에서는 다양한 통신 방법을 활용하여 효율을 증가시키는 기법들이 연구되고 있다. V. Truong 등[6]은 LoRa과 Zigbee를 결합한 네트워크의 성능을 분석했다. 이 연구는 Zigbee 클러스터의 데이터를 모아서 LoRa로 전송하는 방법을 사용하여 시스템의 성능을 분석했고, 본 연구를 통해 이기종 네트워크 혼합의 가능성을 보였다. J. Bravo-Arrabal 등[7]은 재난 상황에 대비하기 위한 하이브리드 무선 센서 네트워크를 구현하여 성능을 측정했다. 이 연구에서는 모바일 노드와 일반 노드를 동시에 사용하는 환경에서 Zigbee과 LoRa의 성능을

비교하여 긴급 상황에서 두 기법의 차이를 보였다. L. Leonardi 등[8]은 BLE네트워크의 클러스터를 연결하는 방법으로 LoRa를 활용하는 LoRaBLE 기법을 제시했다. 이 기법으로 BLE의 짧은 전송거리와 LoRa의 높은 지연시간을 극복할 수 있음을 실증해 보였다. Sisinni 등[10]은 LoRaWAN(LoRa Wide Area Network)과 BLE 메쉬를 결합하여 LoRaWAN의 기존 백엔드를 유지하면서 비상 데이터 전송 시 신뢰성을 높이는 방법을 제안하였다. 이 연구는 LoRaWAN이 신호가 약한 실내 환경에서도 안정적인 데이터 전송을 가능하게 하며, LoRaWAN의 단점인 멀티홉 기능 부족을 BLE 메쉬로 보완하여 응급 상황에서 데이터 손실을 최소화했다. Ayele 등[11]은 야생 동물 모니터링 시스템에서 BLE와 LoRa를 활용하여 통신 거리에 따라 BLE와 LoRa를 선택하여 전송함으로써 에너지 효율성과 데이터 전송 신뢰성을 높이는 시스템을 제안했다. Ferreira 등[12]은 스마트 시티 IoT 네트워크의 성능을 개선하기 위해 LoRa와 BLE를 결합하는 시도를 했다. 구조 작업과 같은 긴급 대응 시나리오에서 LoRa와 ZigBee를 결합하는 기법도 제안되었다. E. Pérez 등[13]은 화재 경보를 위해 BLE와 LoRa를 사용하는 시스템을 제안하였다. 이 시스템에서 BLE는 각 방의 데이터를 수집한 후 LoRa를 통해 관제시스템에 전송하는 방식을 사용하여 전송 효율을 증가시켰다. R. Singh 등[14]은 화재 경보와 대피를 위한 경로를 알려주는 용도로 LoRa와 Zigbee를 활용한 시스템을 제안했다. 이 시스템은 화재 경보는 LoRa를 이용하고 대피 경로를 표시하기 위한 단거리 통신에는 Zigbee를 활용하였고, 시뮬레이션을 통해 각 통신 기법의 성능을 측정했다.

이와 같이, LoRa와 BLE나 ZigBee를 결합한 통신 기법들로 통신 효율을 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다. 위의 연구들은 두 개의 통신 기법을 활용하여 전송 효율을 증가시키고 있다. 하지만 대부분 Zigbee나 BLE로 구성된 클러스터의 정보를 LoRa를 이용하여 장거리에 전송하는 방식이나 근거리용 데이터와 장거리용 데이터를 전송할 때 각각의 전송기법으로 전송하는 방식으로, 대용량 데이터 전송이나 데이터 특성을 고려하지 않았다. 또한, 에너지 수집과 할당을 고려하지 않고 데이터가 일정한 주기로 전송되는 환경만 고려해서 에너지가 고갈되거나 가용 에너지가 사용되지 않고 낭비될 수 있다. 본 논문에서는 이를 개선하여 여러 데이터 종류를 사용하는 환경에서의 에너지의 수집과 할당을 고려한 데이터 수집량 조절로 일반 센서 데이터와 긴급 데이터 수집량을 높이는 기법을 제안한다.

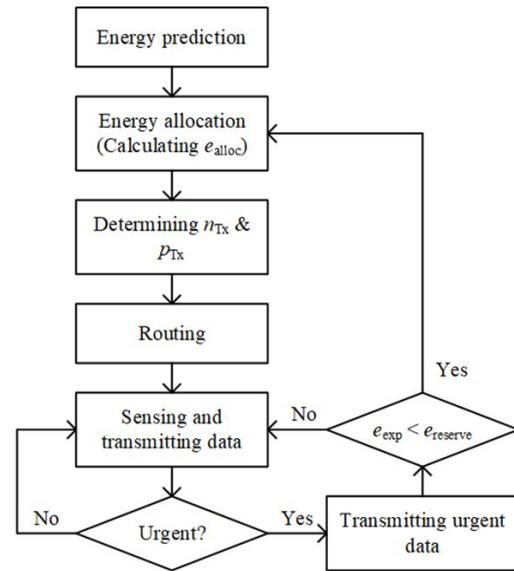


Fig. 1. Operating process.

### III. The Data Collection Method for WSN Using Hybrid LoRa and BLE

#### 1. System Process

본 기법에서 센서 노드는 주기적으로 센싱 데이터를 수집하여 LoRa로 전송하고, 간헐적으로 발생하는 긴급 데이터는 BLE를 이용하여 멀티홉으로 전송한다. 센서 노드는 제한된 에너지를 이 두 동작에 나눠서 사용해야 하므로 효율적인 에너지 활용을 위해 다음과 같은 과정을 거친다. 먼저, ① 모든 센서 노드는 시간을 일정 간격인 라운드 단위로 나누고 각 라운드의 시작에 수집되는 에너지를 예측하고 해당 라운드에 사용할 에너지를 할당한다. 그 후 ② 할당된 에너지로 수집할 수 있는 센싱 데이터 크기와 수집 주기를 결정한다. 이때, 센싱 데이터는 LoRa를 통해 단일 홉으로 싱크 노드에 전송한다. 센싱 주기 결정 후, ③ 긴급 데이터 전송 경로 결정을 위한 라우팅을 수행한다. 긴급 데이터는 BLE를 이용하여 멀티 홉 전송을 해야하므로 라우팅 과정이 필요하다. 센싱 주기 결정과 라우팅 후, ④ 해당 라운드 동안 센서 노드는 센싱 데이터를 수집하여 싱크 노드에 전송하고, 긴급 메시지 발생 시 이를 BLE를 이용하여 싱크 노드에 전송한다. 그림 1은 이 과정을 보여준다.

#### 2. Sensing period determination

제안 기법에서 사용하는 센서 노드는 주기적으로 센싱 데이터를 전송하고, 간헐적으로 긴급 데이터를 전송한다. 따라서 이 두 종류의 동작에 에너지를 나누어 사용해야 한

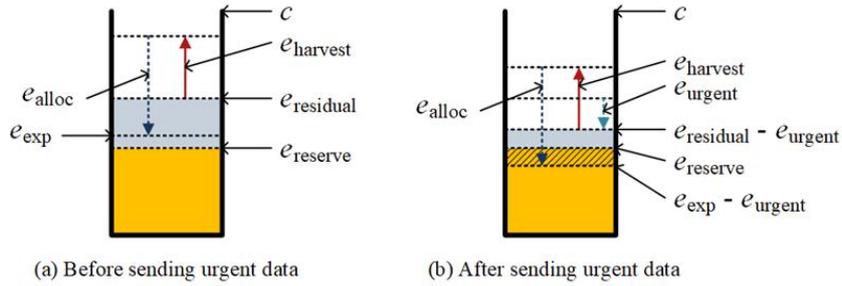


Fig. 2. Energy model of a sensor node.

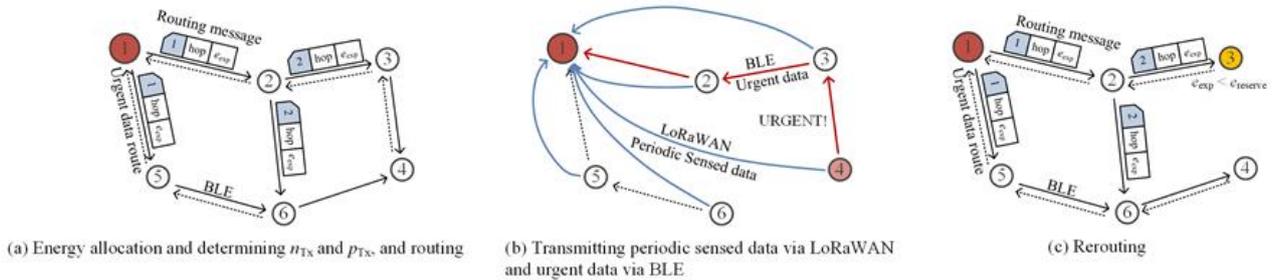


Fig. 3. Example of the proposed scheme.

다. 주기적인 전송은 사용 에너지를 쉽게 예측할 수 있고, 이를 이용하여 라운드당 데이터 수집량과 수집 주기를 쉽게 결정할 수 있다. 반면, 긴급 데이터는 언제 어떻게 발생할지 알 수 없으므로 긴급 데이터 전송 에너지는 예측할 수 없다. 따라서 제안 기법에서 센서 노드는 긴급 데이터 전송에 사용할 에너지를 일정량 비축하고, 그 외의 에너지로 센싱 및 데이터 전송을 하는 방법을 사용한다.

본 기법의 센서 노드는 에너지를 주변 환경으로부터 수집하여 사용하므로, 수집되는 에너지를 노드가 동작하는 범위 내에서 시간의 변화와 관계없이 고르게 소모하기 위해서는 시간별로 수집되는 에너지를 예측하고, 가용 에너지를 할당해주는 기법을 적용할 수 있다. 본 기법에서는 에너지 예측 기법으로 ProEnergy[15]를, 에너지 할당 기법으로 Noh과 Kang의 기법[16]을 사용했다. 기존의 에너지 할당 기법에서는 배터리의 용량  $c$ 와 현재 배터리에 남은 에너지  $e_{residual}$ 를 이용하여 에너지를 할당했지만, 본 기법에서는 긴급 데이터 전송을 위해 에너지  $e_{reserve}$ 를 비축해야 한다. 따라서 에너지 할당을 위해  $c$ 와  $e_{residual}$  대신,  $c - e_{reserve}$ 와  $e_{residual} - e_{reserve}$ 를 각각 사용한다. 이로 인해 센서 노드는 남은 에너지는

$$e_{reserve} < e_{residual} < c \quad (1)$$

의 범위로 유지하면서 해당 라운드에 센싱 데이터 전송에 사용할 에너지  $e_{alloc}$ 를 결정할 수 있다.

센서 노드는 주기적으로 수집된 데이터를 싱크 노드에 전송한다. 수집되는 데이터를 최대화하기 위해  $e_{alloc}$ 로 전송할 수 있는 데이터 수집과 전송 주기를 구해야 한다. 노드는 한 라운드 동안  $e_{alloc}$ 만큼의 에너지를 사용할 수 있으므로

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

가 성립해야 한다. 여기서  $e_{Tx}$ 는 송신 에너지,  $e_{Rx}$ 는 수신 에너지,  $e_{idle}$ 는 그 외에 소모되는 에너지를 나타낸다. 따라서,  $e_{Tx}$ 는

$$e_{Tx} \leq e_{alloc} - e_{idle} - e_{Rx} \quad (3)$$

의 조건을 만족시켜야 한다. 데이터 1회 전송 시 필요한 에너지양이  $e_{unit}$ 일 때, 1라운드에 전송할 수 있는 전송

횟수는  $\frac{e_{Tx}}{e_{unit}}$ 이고, 전송 주기  $p_{Tx}$ 는

$$p_{Tx} = \frac{p_{round}}{\frac{e_{Tx}}{e_{unit}}} \quad (4)$$

가 된다. 여기서  $p_{round}$ 는 1라운드의 주기이고,  $e_{unit}$ 는 센서 노드의 스펙을 이용하여 계산하거나 측정하여 알 수 있다. 위의 수식 (4)를 이용하여 센싱 데이터 수집과 전송 주기를 구할 수 있다. 즉,  $p_{Tx}$  주기로 데이터를 수집하고

전송하면 긴급 데이터를 위한 에너지를 남기는 동시에 최대한 많은 데이터를 균일하게 수집할 수 있다. 그림 2는 센서 노드의 에너지 모델을 보여준다.

### 3. Operation of a sensor node for urgent data

LoRaWAN를 이용한 데이터 수집은 단일 홉 전송을 하므로 라우팅이 필요하지 않지만, 긴급 데이터를 위한 BLE 통신은 전송 거리가 짧아서 데이터를 직접 싱크 노드에 전송할 수 없으므로 멀티 홉 통신을 위해 라우팅을 해야 한다. 이때, 제안 기법에서는 센서 노드 간에 에너지를 균형 있게 소모하기 위해서 에너지를 고려한 MDT(Minimum Depth Tree) 방식을 사용하여 매 라운드 시작 시 라우팅을 한다. 라우팅 과정은 싱크 노드부터 라우팅 메시지를 전송하고, 이를 받은 노드는 자신의 부모 노드를 결정하여 라우팅 메시지를 브로드캐스팅 한다. 만약 노드가 부모 노드를 결정한 이후에 더 적합한 부모 노드로부터 라우팅 메시지를 받으면 자신의 경로를 수정하고, 이 과정에서 홉 수가 변경되면 다시 라우팅 메시지를 전송한다. 이를 반복하여 모든 노드가 자신의 경로를 결정하면 종료된다.

라우팅 과정에서 에너지를 고려하기 위해 각 노드는 해당 라운드에 사용할 에너지와 충전될 에너지  $e_{\text{harvest}}$ 를 고려한 남은 에너지  $e_{\text{exp}}$ 를 자신의 홉 수와 함께 라우팅 메시지에 포함하여 전송한다.  $e_{\text{exp}}$ 는

$$e_{\text{exp}} = e_{\text{residual}} - e_{\text{alloc}} + e_{\text{harvest}} \quad (5)$$

이고, 이는  $e_{\text{reserve}}$ 보다 커야 한다. 이를 받은 센서 노드는 홉 수가 적은 노드를 우선적으로 부모 노드로 선택하고, 홉 수가 같다면  $e_{\text{exp}}$ 가 큰 노드를 자신의 부모 노드로 선택하여 경로를 결정한다. 긴급 데이터 전송 시, 이렇게 결정된 경로로 전송함으로써 센서 노드의 부하를 분산시켜 에너지를 균형있게 소모하여 데이터를 전달할 수 있다.

긴급 데이터 전송 후에는 일부 노드들의 에너지가 더 낮아서 더 이상의 긴급 데이터를 전송할 수 없을 수 있다. 그러므로 긴급 메시지 전송 후에는 라우팅을 다시 수행하여 에너지 고갈을 막고 에너지의 불균형을 낮춰야 한다. 특히,  $e_{\text{exp}} < e_{\text{reserve}}$ 인 노드는 긴급 메시지 전송이 어려울 수 있으므로 라우팅에서 제외하고, 에너지 할당과 전송 주기 계산을 다시 수행하여  $e_{\text{reserve}}$ 만큼의 에너지를 확보할 수 있게 한다.

위의 과정을 수행하며 센서 노드는 수집되는 에너지를 활용하여 가용 에너지 범위 내에서 긴급 데이터 전송 에너

지를 확보하는 동시에 센싱 데이터를 고르게 수집하여 LoRaWAN으로 전송할 수 있다. 또한 긴급 데이터 발생 시 미리 확보해둔 에너지를 사용하여 BLE로 데이터를 전송할 수 있다. 그림 3는 제안기법의 수행 과정 예를 보여준다.

## IV. Performance Evaluation

우리는 제안된 기법의 성능을 평가하기 위해 SolarCastalia[17]를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션에서는 BLE만 사용한 경우(BLE), LoRa만 사용한 경우(LoRa), E. D. Ayele 등[11]이 제안한 기법을 적용한 경우(WMS), 그리고 제안 기법(Hybrid)의 세 가지 기법의 성능을 측정하여 비교하였다. BLE, LoRa, WMS 기법은 주기적으로 센싱 데이터를 수집하여 싱크 노드에 전달하고, 제안 기법은 적응적으로 센싱 데이터 수집주기를 변경하여 전달한다. 긴급 메시지는 일정 범위 내에서 무작위 시간에 발생한다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 주요 파라미터를 보여준다.

Table 1. Simulation Parameters

Parameters	Values
Number of nodes	100
Node density	0.04
Duration of a round	1 hour
Sensor Battery capacity	110 mAh
Sensing data size	20 bytes
Urgent data size	32 kbytes
BLE data rate	250 kbps
LoRa data rate	5.47 kbps
LoRa spreading factor	7
LoRa bandwidth	125 kHz
Transmission power	2 dBm
Sleep power	3.3 $\mu$ W

### 1. Performance evaluation according to the number of nodes

그림 4와 5는 각각 전체 노드 수의 변화에 따른 수집한 누적 센서 데이터 수와 긴급 데이터 수를 보여준다. 그림 4에서 전체 노드 수가 증가함에 따라 전체적으로 수집되는 데이터양이 증가하지만, BLE의 경우는 150개 이후로 거의 증가되지 않는다. 이는 노드 수가 많을 수록 더 많은 홉을 거쳐 전송하고 싱크 노드 주변의 노드가 전송해야 하는 데이터양이 더욱 증가하므로 이들 노드의 에너지가 고갈되어 더 많은 데이터를 전송할 수 없기 때문이다. LoRa, WMS와 제안 기법은 노드 수에 따라 더 많은 데이터를 수집하는 것을 볼 수 있는데, 제안 기법이 에너지 상황에 따

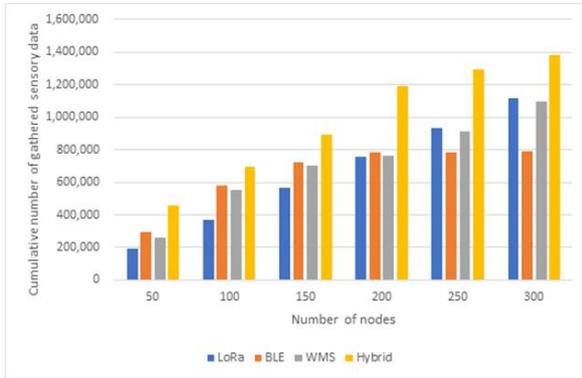


Fig. 4. Comparison of the amount of sensory data gathered according to the number of nodes.

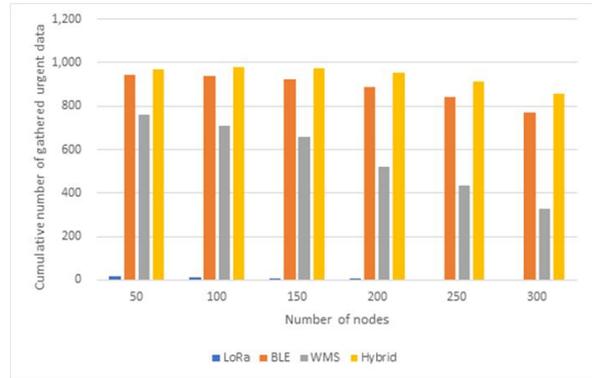


Fig. 5. Comparison of the amount of urgent data gathered according to the number of nodes.

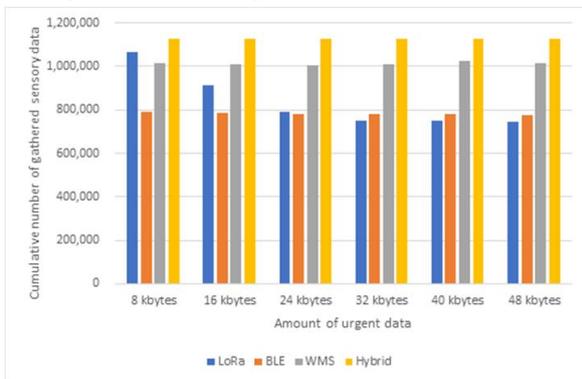


Fig. 6. Comparison of the amount of sensory data gathered according to the length of urgent data.

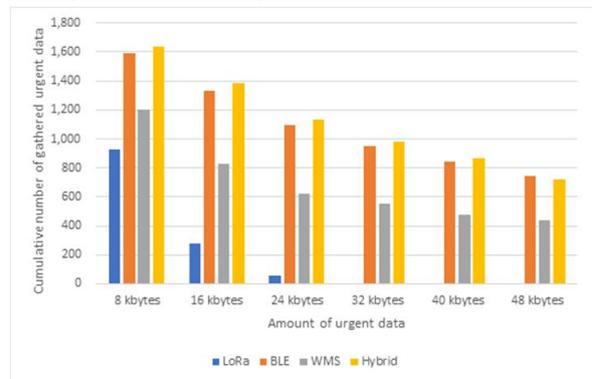


Fig. 7. Comparison of the amount of urgent data gathered according to the length of urgent data.

라 전송량을 조절함으로써 더 많은 데이터를 수집할 수 있는 것으로 나타났다. WMS기법은 LoRa와 BLE를 적절히 선택함으로써 대부분의 경우 좋은 결과를 보였지만, 제안된 기법이 에너지 예측과 할당이 적용되어 데이터를 더 많이 수집한 것을 볼 수 있다. 그림 5의 긴급 데이터 전송량에서, LoRa는 거의 전송되지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 LoRa의 ToA (Time-On-Air)가 커서 대량의 데이터를 전송하기엔 시간이 충분하지 않기 때문이다. 또한, WMS 기법은 노드수가 많아질 수록 성능이 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 노드 수가 많으면 BLE기법보다 LoRa기법을 사용하는 노드가 증가하기 때문이다. 반면, BLE과 제안기법은 노드 수에 관계없이 비슷한 수의 긴급데이터를 전송하지만 제안기법이 조금 더 많은 데이터를 전송하는 것을 볼 수 있다. 이는 제안 기법이 긴급데이터 전송용 에너지를 비축하여 긴급상황에 더 잘 대처했기 때문이다.

**2. Performance evaluation according to the size of the urgent data**

그림 6과 7은 각각 긴급 데이터 크기의 변화에 따른 수집한 누적 센서 데이터 수와 긴급 데이터 수를 보여준다.

그림 6에서 긴급 데이터 크기가 커질수록 LoRa의 데이터 수집량이 하락하는 것을 볼 수 있다. 이는 LoRa의 대용량의 긴급 데이터 전송을 장시간 수행하느라 일반 센서 데이터를 시간 내에 전송하지 못한 경우가 많았기 때문이다. BLE, WMS과 제안 기법은 긴급 데이터 크기 변화에 영향을 거의 받지 않는 것을 볼 수 있는데, 그 중, 제안 기법은 일반 센싱 데이터를 LoRa로 전송하므로 BLE보다 나은 성능을 보인다. 그림 7에서 긴급 데이터 전송량을 보면, 긴급 데이터가 8 kB인 경우에는 LoRa도 꽤 많은 양을 전송하는 반면, 그 보다 큰 긴급 데이터는 거의 전송할 수 없는 것을 볼 수 있다. 이는 LoRa의 긴 ToA때문이다. 이에 LoRa는 전송 시간이 느려 대용량 전송이 취약함을 볼 수 있다. WMS는 일부 긴급 메시지를 LoRa로 전송하므로 BLE와 제안 기법에 비해 데이터를 적게 전송하는 것을 볼 수 있다. BLE와 제안 기법은 긴급 데이터가 커지면 더 적은 양의 긴급 데이터를 전송하는 것을 볼 수 있는데, 이는 긴급 데이터를 전송하는 경로의 센서 노드가 큰 데이터 전송을 위해 자신의 에너지가 고갈되어 데이터가 손실된 것으로 판단된다. 제안 기법은 이 경우에도 다른 기법에 비해 긴급 데이터를 더 많이 전송한 것을 볼 수 있다.

위와 같이, 제안된 기법은 다른 두 기법에 비해 센서 데이터 수집량과 긴급 데이터 수집량 모두에서 더 좋은 성능을 보였다. 그 이유는 에너지에 따라 데이터 수집량을 적절히 조절하고 긴급 데이터를 위한 에너지를 비축함으로써 데이터를 더욱 손실 없이 전송할 수 있었던 것으로 판단된다.

## V. Conclusions

본 논문에서는 에너지를 수집하여 사용하는 센서 노드가 주기적으로 환경 데이터를 수집하고, 간헐적으로 발생하는 긴급 데이터를 싱크 노드에 전송하는 무선 센서 네트워크에서 LoRa과 BLE의 두 가지 기술을 활용하여 센서 노드의 에너지가 고갈되지 않는 범위 내에서 데이터 수집량을 증가시키는 기법을 제안하였다. 센서 노드는 에너지 상황을 고려하여 긴급 데이터 전송을 위한 에너지를 비축해 두고, 나머지 에너지를 사용하여 센싱 데이터를 수집하며, 비축한 에너지를 소모하게 되면 이를 보충하기 위해 센싱 주기를 조절하는 방식을 통해 에너지 관리를 수행하였다. 이를 통해 긴급 데이터가 발생할 경우, 안정적으로 전송할 수 있었고, 동시에 가능한 많은 양의 환경 데이터를 지속적으로 수집할 수 있었다. 실험 결과, 제안된 기법은 센서 노드의 에너지를 효과적으로 관리하여 긴급 데이터를 신속하게 처리하면서도, 센싱 데이터 수집량을 최대화했다는 것을 볼 수 있었다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the Korean MSIT(Ministry of Science and ICT), under the Graduate School of Metaverse Convergence support (IITP 2024-RS-2024-00430997).

## REFERENCES

- [1] H. Yetgin, K. T. K. Cheung, M. El-Hajjar, and L. Hanzo, "A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 828-854, Feb. 2017. DOI: 10.1109/COMST.2017.2650979
- [2] R. M. Curry and J. C. Smith, "A survey of optimization algorithms for wireless sensor network lifetime maximization," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 101, pp. 145-166, Aug. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.028>
- [3] D. K. Sah and T. Amgoth, "Renewable energy harvesting schemes in wireless sensor networks: A Survey," *Information Fusion*, vol. 63, pp. 223-247, Jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.07.005>
- [4] A. J. Williams, M. F. Torquato, I. M. Cameron, A. A. Fahmy, and J. Sienz, "Survey of Energy Harvesting Technologies for Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 77493-77510, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3083697
- [5] I. Yoon, "Data Acquisition Control for UAV-Enabled Wireless Rechargeable Sensor Networks," *Sensors*, vol. 23, no. 7, pp. 3582, 2023. DOI:10.3390/s23073582
- [6] V. Truong, A. Nayyar, and S. A. Lone, "System performance of wireless sensor network using LoRa-Zigbee hybrid communication," *Computers, Materials & Continua*, vol. 68, no. 2, pp. 1615-1635, 2021.
- [7] J. Bravo-Arrabal, P. Zambrana, J. J. Fernandez-Lozano, J. A. Gomez-Ruiz, J. S. Barba, and A. García-Cerezo, "Realistic Deployment of Hybrid Wireless Sensor Networks Based on ZigBee and LoRa for Search and Rescue Applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 64618-64637, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3183135
- [8] L. Leonardi, L. Lo Bello, and G. Patti, "LoRa support for long-range real-time inter-cluster communications over Bluetooth Low Energy industrial networks," *Computer Communications*, vol. 192, pp. 57-65, May 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.05.026>
- [9] 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, 2016.
- [10] E. Sisinni, A. Depari, A. Flammini, S. Rinaldi, and P. Ferrari, "Evaluating the joint use of LoRaWAN and Bluetooth mesh to improve survivability for critical sensor applications," *IEEE Sensors Journal*, 2024.
- [11] E. D. Ayele, K. Das, N. Meratnia, and P. J. M. Havinga, "Leveraging BLE and LoRa in IoT network for wildlife monitoring system (WMS)," *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 342-348, Singapore, Singapore, Feb. 2018. DOI: 10.1109/WF-IOT.2018.8355200
- [12] C. M. S. Ferreira, R. A. R. Oliveira, and J. S. Silva, "Low-energy smart cities network with LoRa and bluetooth," *2019 7th IEEE International Conference on Mobile Cloud Computing, Services, and Engineering (MobileCloud)*, pp. 24-29, Newark, CA, USA, Apr. 2019.
- [13] E. Pérez, R. Parada, and C. Monzo, "Global emergency system

- based on WPAN and LPWAN hybrid networks. *Sensors*, Sensors, vol. 22, no. 20, pp. 7921, Oct. 2022.
- [14] R. Singh, G. S. Birajdar, M. Rashid, A. Gehlot, S. V. Akram, A. S. AlGhamdi, and S. S. Alshamrani, "Hybrid architectural network implementation to realize a fire evacuation path with 2.4 ghz zigbee and lora," *Sustainability*, vol. 13, no. 23, p.13238, Nov. 2021.
- [15] A. Cammarano, C. Petrioli, and D. Spenza, "Pro-Energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks," 2012 IEEE 9th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS 2012), pp. 75-83, Las Vegas, NV, USA, Oct. 2012.
- [16] 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, Sept. 2011.
- [17] 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. 415174, 2015.

## Authors



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.



Dong Kun Noh received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Computer Science and Engineering from Seoul National University, Korea, in 2000, 2002, and 2007, respectively. He is currently a professor in School of AI

Convergence, Soongsil University. His primary research interests include cyber-physical system, mobile computing, and internet of things.