

Assessing the ED-H Scheduler in Batteryless Energy Harvesting End Devices: A Simulation-Based Approach for LoRaWAN Class-A Networks

Sangsoo Park*

*Professor, Dept. of Computer Science & Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

[Abstract]

This paper proposes an integration of the ED-H scheduling algorithm, known for optimal real-time scheduling, with the LoRaEnergySim simulator. This integration facilitates the simulation of interactions between real-time scheduling algorithms for tasks with time constraints in Class-A LoRaWAN Class-A devices using a super-capacitor-based energy harvesting system. The time and energy characteristics of LoRaWAN status and state transitions are extracted in a log format, and the task model is structured to suit the time-slot-based ED-H scheduling algorithm. The algorithm is extended to perform tasks while satisfying time constraints based on CPU executions. To evaluate the proposed approach, the ED-H scheduling algorithm is executed on a set of tasks with varying time and energy characteristics and CPU occupancy rates ranging from 10% to 90%, under the same conditions as the LoRaEnergySim simulation results for packet transmission and reception. The experimental results confirmed the applicability of co-simulation by demonstrating that tasks are prioritized based on urgency without depleting the supercapacitor's energy to satisfy time constraints, depending on the scheduling algorithm.

▶ **Key words:** LoRaWAN, ED-H Scheduling Algorithm, Super-Capacitor, Energy Harvesting, Simulation

[요 약]

본 논문에서는 LoRaEnergySim에 최적의 실시간 스케줄링 알고리즘으로 알려진 ED-H 스케줄링 알고리즘을 연동하여 LoRaWAN 클래스-A 단말기에 슈퍼 커패시터 기반의 에너지 하베스팅 시스템을 전원 공급 장치를 적용하였을 때 시간 제약성을 갖는 LoRaWAN 컨트롤러의 태스크와 응용 태스크의 실시간 스케줄링 알고리즘 간의 상호 시뮬레이션이 가능하도록 한다. 이를 위해 LoRaWAN의 상태와 상태 전환에 따른 시간과 에너지 특성을 로그 형태로 추출하고 타임 슬롯 기반의 ED-H 스케줄링 알고리즘에 적합하도록 태스크 모델을 수립하고 태스크가 CPU에 의해서 수행되는 특성에 따라 알고리즘이 시간 제약성을 만족하며 태스크를 수행할 수 있도록 확장하였다. 본 논문에서 제안한 기법의 평가를 위해 LoRaEnergySim 시뮬레이션 결과가 제시된 동일 환경에서 패킷 송수신이 수행되는 것과 동시에 10%에서 90%의 CPU 점유율을 갖는 다양한 시간과 에너지 특성을 갖는 태스크 집합에 대해 ED-H 스케줄링 알고리즘을 수행하였으며, 실험 결과로 스케줄링 알고리즘에 따라 시간 제약성의 만족을 위해 슈퍼 커패시터의 에너지가 고갈되지 않는 한 태스크의 시급성을 우선하여 사용하는 것을 확인하여 상호 시뮬레이션의 적용 가능성을 확인하였다.

▶ **주제어:** LoRaWAN, ED-H 스케줄링 알고리즘, 슈퍼 커패시터, 에너지 하베스팅, 시뮬레이션

- First Author: Sangsoo Park, Corresponding Author: Sangsoo Park
- *Sangsoo Park (sangsoo.park@ewha.ac.kr), Dept. of Computer Science & Engineering, Ewha Womans University
- Received: 2023. 12. 27, Revised: 2024. 01. 09, Accepted: 2024. 01. 15.

I. Introduction

사물 인터넷 (IoT: Internet-Of-Things)의 급속한 성장으로 인해 안정적이고 효율적인 무선 통신 기술에 대한 요구가 커지고 있다[1]. LoRaWAN은 비면허 무선 스펙트럼에서 저전력 확산 스펙트럼(CSS: Chirp Spread Spectrum) 변조를 통해 작동하는 낮은 데이터 속도로 장거리 통신이 가능한 고유의 특성으로 사물 인터넷을 위해 개발된 다양한 통신 방식 중에서 선두 주자로 부상하였다[2]. LoRaWAN은 원격 센서 단말기가 게이트웨이와 직접 통신한 후 네트워크 서버와 통신하는 스타 토폴로지를 기반으로 확장성과 유연성을 보장하여 네트워크가 다양한 통신 밀도와 노드 배치 시나리오에 대한 적용이 가능하다.

이와 같이 LoRaWAN은 최대 수 km까지 도달할 수 있는 통신을 지원하기 때문에 원격 자산을 모니터링하고 지리적으로 분산된 위치에서 데이터의 수집에 주로 사용되며 이를 위한 LoRaWAN 단말기는 배터리 교체 등 유지보수 비용과 환경에 미치는 영향을 최소화해야 한다. 이러한 요구사항을 만족하기 위해 LoRaWAN 단말기는 최소한의 소비전력으로도 작동하도록 하여 배터리로 최대 수년 동안 작동할 수 있도록 설계하는 것이 일반적이다[3].

단말기를 리튬 이온 혹은 폴리머 기반의 배터리만으로 구성하면 배터리의 수명 제한과 교체의 어려움 등으로 지속 가능하고 안정적인 운영이 어려울 수 있다. 태양광 패널은 태양광으로부터 에너지를 수확하여 이러한 사물 인터넷을 위한 단말기에 전력을 공급할 수 있는 대안으로 널리 적용되고 있으며, 날씨 등의 영향으로 일시적으로 전력 공급이 중단될 수 있는 점을 보완하기 위해 주로 슈퍼 커패시터와 같은 보조 전원 장치와 결합되어 사용되고 있다[4]. 슈퍼 커패시터는 태양광 패널과 단말기 사이에 에너지 버퍼 역할을 하여 수확된 잉여 에너지를 저장했다가 조도가 낮거나 전력 수요가 높은 시간에 방출한다. 특히 기존의 배터리보다 사이클 수명, 즉 충전과 방전 주기가 훨씬 길어 수명이 더욱 향상되고 유지보수가 최소화되는 장점을 갖는다.

ISM (Industrial, Scientific, Medical) 무선 주파수 대역은 전 세계적으로 비면허 무선 통신을 위해 지정된 주파수의 범위를 말하며 LoRaWAN은 ISM 대역, 특히 서브-GHz 주파수에서 작동한다. 비록 ISM 대역이 비면허 무선 통신을 위해 지정되어 있으나 여전히 규제 당국으로부터 최대 출력 제한 및 듀티 사이클(DC: duty cycle)을 통해 구현되는 최대 주파수 채널 점유 시간 제한 등이 존재한다[5].

듀티 사이클은 무선 단말기가 특정 기간 내에 전송할 수 있는 시간의 비율을 나타내며, 슬라이딩 윈도우는 듀티 사이클이 계산되는 시간을 의미한다. 이 제한은 다른 단말기와의 통신 간섭을 방지하고 네트워크에 대한 공평한 접근을 보장하기 위해 적용되는데 예를 들어 유럽에서는 모든 채널에 대해 1%의 듀티 사이클이 적용되는 등 규제 당국에 의해 강제된다.

또한 LoRaWAN은 표 1과 같이 대상이 되는 응용에 따라 성능과 소비전력 간에 서로 다른 절충점을 제공하는 세 가지 클래스로 정의된다. 그중 클래스-A는 데이터 전송률은 낮으나 소비전력이 낮아 주로 원격 센싱 응용에 사용된다[6].

Table 1. Comparison of LoRaWAN Classes

Feature	Class-A	Class-B	Class-C
Downlink communication	During two short RX windows	Scheduled by the network	Continuous listening
Power Consumption	Low	Medium	High
Data Rate	Low	Medium	High
Applications	Remote sensors	Industrial monitoring	Real-time control & monitoring

클래스-A가 주요 응용 대상으로 하는 원격 센싱의 경우 주기적으로 센서값을 획득한 후 태스크에 의해 센서값에 대한 처리를 한 결과를 게이트웨이로 송신하게 된다. 반대로 단말기가 게이트웨이로부터 수신을 받을 경우는 LoRaWAN 표준에 의해 단말기에서 처리된 센서 데이터를 송신한 이후 특정 두 시간 윈도우 내에서 게이트웨이로부터 데이터를 수신받도록 한다.

이러한 LoRaWAN 클래스-A의 특성으로 인하여 듀티 사이클로 구현되었을 때 각 단말기는 주기적으로 센서 데이터를 획득, 처리, 송신한 이후 게이트웨이로부터 데이터를 수신하는 시간 윈도우가 정의되어 있어 실시간 스케줄링 알고리즘에 의해 각 단계가 시간 제약성을 만족하도록 하고 유휴 시간에 단말기 컨트롤러의 동작 모드를 슬립 모드로 변경함으로써 소비전력이 최소화한다.

슈퍼 커패시터가 결합된 태양광 기반의 에너지 하베스트 시스템을 LoRaWAN 클래스-A 단말기에 적용할 경우 이러한 실시간 스케줄링 알고리즘에 의해서 원격 센싱의 지속 가능하고 안정적인 운영이 가능하다.

이에 적용될 수 있는 다양한 실시간 스케줄링 알고리즘이 제안되어 왔으나, ED-H 스케줄링 알고리즘이 슈퍼 커

패시터, 충전식 배터리와 같은 보조 전원을 포함하는 에너지 하베스팅 시스템 환경에서 시간 제약성을 갖는 태스크가 생산되고 임시로 저장되는 전력을 고려하여 스케줄링하는 유일한 최적의 실시간 스케줄링으로 알려져 있다[7].

본 논문은 배터리가 없는 에너지 하베스팅 기반의 LoRaWAN 클래스-A 단말기에서 ED-H 스케줄링 알고리즘의 적용 가능성을 검증하기 위해 ED-H 스케줄링 알고리즘을 구현하고 다수의 단말기가 적용된 네트워크에서 다양한 상황의 무선 통신 송수신 타임라인에 대해 실험을 수행하기 위해 대규모 LoRaWAN 환경에서 무선 패킷의 시간 및 소비전력 특성의 도출이 가능한 시뮬레이터인 LoRaEnergySim[2][8]에 연동하는 기법을 설계하고 구현한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무선 패킷의 시간 및 소비전력 특성 면에서 에너지 하베스팅 시스템과 이에 적용되는 실시간 스케줄링 알고리즘과 관련된 기존 연구를 비교한다. 3장에서는 본 논문에 적용된 ED-H 알고리즘을 기반으로 LoRaEnergySim 시뮬레이터와의 연동을 위한 소프트웨어 모듈의 설계와 구현 방법을 기술하며 4장은 상호 시뮬레이션을 통해 배터리가 없는 에너지 하베스팅 기반의 LoRaWAN 클래스-A 단말기에서 ED-H 스케줄링 알고리즘의 적용 가능성을 검증한다. 마지막으로 5장은 본 논문의 결론과 향후 연구과제를 기술한다.

II. Related Works

에너지 하베스팅 시스템 환경에서의 실시간 스케줄링에 대한 연구 중에서 [9]는 현재 에너지 수준을 동적으로 조정하는 알고리즘을 도입하여 에너지가 부족한 시나리오에서도 태스크의 운영 연속성을 보장하는 연구를 수행하였고 [10]은 에너지 하베스팅 시스템에서의 에너지 수확 예측 모델에 따라 태스크의 실행이 좌우되는 접근 방식을 제안하여 소비전력의 낭비를 최소화하였다. [11]은 에너지 하베스팅 모델에 대한 시뮬레이션 분야의 연구에서 인공지능 기법을 적용한 에너지 수확 모델을 개발하여 다양한 수확 조건을 모방한 시뮬레이션 방법을 제안하여 새로운 접근 방법과의 비교가 가능하도록 하였다.

에너지 하베스팅을 위한 실시간 운영체제와 관련된 연구의 경우 [12]와 같이 에너지를 인지하는 스케줄링 알고리즘을 실시간 운영체제에 통합하는 것이 일반적으로 기존 태스크 스케줄러를 분석하고 배터리 없이 에너지 수확량에 따라 스케줄링 정책을 수정함으로써 실시간 시스템

에서 보다 효율적인 에너지 관리가 가능하다는 것을 보여주었다.

LoRaWAN 단말기 노드의 에너지 특성과 관련된 연구는 주로 에너지 효율을 최적화하는 데 초점을 맞추고 있으며 [13]은 소비전력에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하고 노드의 에너지 소비 패턴에 대한 분석을 제시하였으며 특히 전송 전력과 듀티 사이클링 최적화의 필요성을 제안하였다. [14]는 LoRaWAN 단말기와 직접적으로 통신을 수행하는 게이트웨이의 다양한 배치 시나리오가 전체 네트워크의 에너지 소비에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구를 수행하였으며 단말기 노드의 배치 밀도가 에너지 효율적인 배포를 위한 중요한 요소임을 제안하였다.

기존 연구에서는 LoRaWAN 동작을 위한 태스크에 한정하여 시뮬레이션을 수행하거나 시간 제약성이 없는 태스크 집합에 대해 한정하거나 모든 시간 제약성을 만족하도록 스케줄링 하는 것이 아닌 일부 태스크의 시간 제약성을 만족하지 못하는 것을 허용하되 최대한 만족하도록 하는 연성 실시간 시스템을 대상으로 하며, 전원 공급 시스템에서 보조 전원 장치로 리튬 이온 배터리를 가정하는 등 본 논문이 대상으로 하는 시스템에 적용하는데 한계가 있다.

본 논문에서는 태스크의 실행을 관리하는데 중추적인 역할을 하는 실시간 스케줄링 알고리즘에서 제한된 에너지 내에서 소비전력을 최소화하는 동시에 태스크의 시간 제약을 만족하도록 하며 LoRaWAN 클래스-A의 시간 및 전력 특성에 맞도록 적용하며, 기존 연구에서 개별적으로 수행되었던 에너지 하베스팅 시스템의 특성, 실시간 스케줄링 알고리즘, LoRaWAN 클래스-A의 듀티 사이클링에 의한 태스크와 무선 패킷 송수신 타임라인, 그리고 시뮬레이션을 통한 대규모 환경에서의 시간 및 전력 특성에 대해 단말기의 수행 형태를 반영한 스케줄링 알고리즘을 시뮬레이터에 연동을 제안하여 기존 연구와 차별성을 갖는다.

III. The Proposed Scheme

1. Extraction of Timing and Energy Characteristic from LoRaEnergySim

LoRaEnergySim은 다양한 네트워크 조건과 구성에서 LoRaWAN 노드의 에너지 소비를 분석하고 예측하도록 설계된 시뮬레이션 프레임워크로 본 논문에서 목표하는 ED-H 알고리즘이 LoRaWAN 클래스-A의 듀티 사이클에 적용되었을 때 네트워크의 에너지 효율과 운영 효과를 검증할 때 효과적이다.

그림 1과 같이 LoRaEnergySim의 소프트웨어 구조는 각 노드로부터 수신되는 패킷에 따라 응답 패킷을 클래스-A 표준에 따라 응답 패킷을 스케줄링하여 듀티 사이클을 강제하는 기능을 갖는 게이트웨이(Gateway), 무선 통신의 특성에 따라 확산 인자, 신호 대 잡음비 모델을 기반으로 패킷 전달 성공 여부를 결정하는 대기 인터페이스(Air Interface), 그리고 패킷의 전송, 수신, 유희 상태 등 단말기의 상태 전환 모델(State Machine)에 따라 시간 경과에 따른 에너지 사용량을 정밀하게 시뮬레이션하는 노드(Node)로 구성된다.

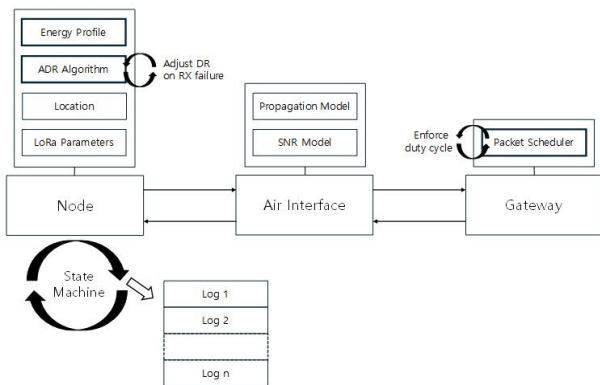


Fig. 1. Software Architecture for LoRaEnergySim

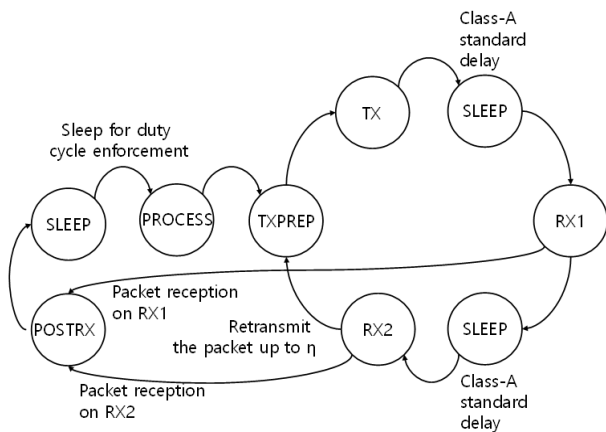


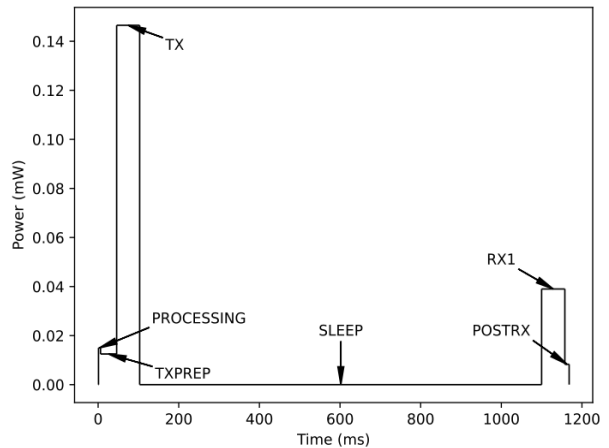
Fig. 2. State Machine for Packet Transmission and Reception in a Node

각 노드는 LoRaWAN 클래스-A의 표준과 단말기를 구성하는 하드웨어와 소프트웨어의 시간 및 에너지 특성 파라미터에 기반하여 패킷을 대기 인터페이스를 통해 게이트웨이로 송신하고 게이트웨이로부터 패킷에 대한 응답을 수신하는 과정을 하나의 라운드로 한다. 각 라운드 사이에 듀티 사이클을 준수하기 위한 시간을 계산한 후 노드를 유희 상태로 전환하는 순서로 수행되며 이를 일정한 주기로 반복하는 형태로 시뮬레이션이 수행된다.

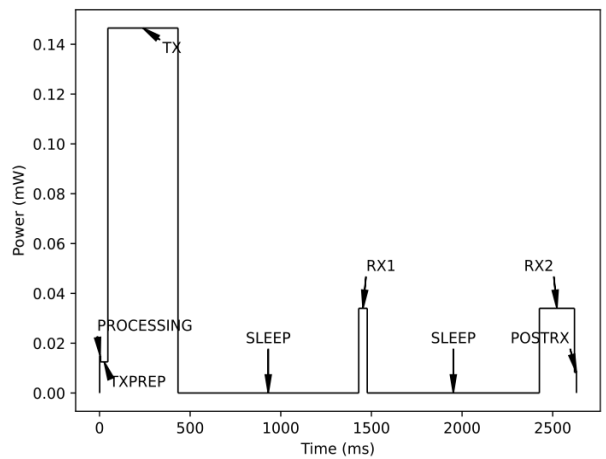
```

ID 19 ROUND 2 SLEEP 29999999.999999985 170.9999999999991
ID 19 ROUND 2 PROCESS 5 0.075
ID 19 ROUND 2 TXPREP 40 0.5
ID 19 ROUND 2 TX 1253.3760000000002 183.61958400000003
ID 19 ROUND 2 SLEEP 997.0 0.0056829
ID 19 ROUND 2 RX1 170 6.4
ID 19 ROUND 2 SLEEP 826.599999999940395 0.004711619999966026
ID 19 ROUND 2 RX2 193.536 6.580224
ID 19 ROUND 2 POSTRX 10.7 0.08881
    
```

Fig. 3. An Example of Logs Extracted from LoRaEnergySim Node Framework



(a) Packet Received during RX1



(b) Packet Received during RX2 (RX1 Reception Failed)

Fig. 4. An Example of Timing and Power Characteristics Depicted by the Extracted Logs

본 논문에서는 각 노드에서 패킷별로 시간 경과에 따른 에너지 사용량이 계산되는 그림 2의 LoRaEnergySim의 노드의 상태 전환 모델로부터 ED-H 스케줄링 알고리즘에서 수행되는 응용 태스크와의 상호 시뮬레이션의 구현을 위해 각 노드(ID)와 노드 내에서의 패킷 순서(ROUND)에 대해 상태 전환 모델에서 하나의 상태에서 소비되는 전력과 다음 상태로 전환되기까지 소요되는 시간을 그림 3에서

기술된 형태의 로그로 추출한다.

추출된 로그를 기반으로 하나의 패킷이 시간 경과에 따른 에너지 사용량을 도식화한 예는 그림 4와 같다. 그림 2의 상태 전환 모델에서 기술된 바와 같이 LoRaWAN 클래스-A는 단말기가 패킷을 게이트웨이에 송신한 이후 표준에 따라 지정된 RX1, RX2 시간 윈도우에서만 패킷의 수신이 가능하며 RX1에서 수신에 성공할 경우 RX2는 무시된다.

2. Task Model Design

본 논문의 ED-H 스케줄링 알고리즘은 타임 슬롯 기반의 태스크 모델을 기반으로 하며 태스크는 주기성을 갖는 n 개의 태스크 $\tau_i(C_i, R_i, D_i, T_i, E_i); i=1, \dots, n$ 로 정의된다. 표 2는 각 항의 값을 기술하며 그림 5는 시간 경과에 따른 태스크의 수행 예를 나타낸다.

Table 2. Task Model Terms for ED-H Scheduling Algorithm

Term	Value for τ_i
C_i	Worst-case execution time
R_i	Release time
D_i	Deadline
T_i	Period
E_i	Worst-case energy consumption

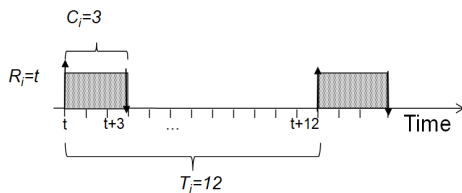
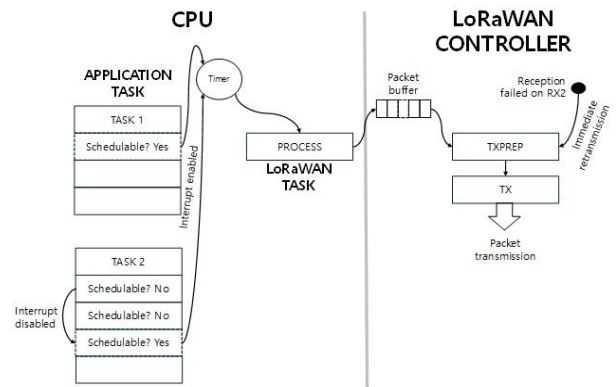


Fig. 5. An Example of ED-H Task Model

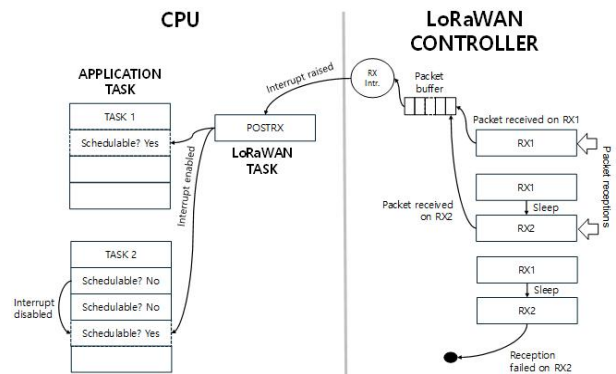
표 2에서 C_i 는 태스크 τ_i 의 최악의 경우에 소요되는 수 태스크의 수행 시간, R_i 는 τ_i 의 처음 시작되었을 때의 절대 시각, D_i 는 τ_i 의 마감 기한, T_i 는 주기적으로 수행되는 τ_i 의 실행 주기, E_i 는 최악의 경우 τ_i 가 C_i 가 균등하게 소비하는 에너지량으로 정의한다. 그림 5는 $C_i=3, R_i=t, T_i=12$ 의 시간 제약성을 갖는 태스크 τ_i 의 예를 나타낸 것으로 태스크가 실행 주기에 따라 $t, t+12$ 에서 각각 시작되어 다음 수행 주기 이전에 3 시간 단위를 수행해야 시간 제약성을 만족한다.

LoRaWAN은 ED-H 스케줄링 알고리즘과는 달리 타임 슬롯 기반으로 동작하지 않지만 본 논문에서 상호 시뮬레이션에 연동하기 위해 LoRaEnergySim의 상태 전환 모델

의 상태 간 전환 시간을 1ms 단위의 타임 슬롯으로 분할하여 ED-H 스케줄링 알고리즘의 타임 슬롯 단위에 매핑하고 각 상태에서 소비하는 CPU 시간 및 슈퍼커패시터와 태양광 패널에 의한 에너지를 소비하는 방법으로 구현하였다. 이때 다음 상태로 전환되기까지 소비되는 에너지는 해당 상태에서 소비되는 전력이 각 타임 슬롯에서 균등하게 소비된다고 가정한다.



(a) Packet Transmission



(b) Packet Receptions

Fig. 6. Task Model for Packet Transmission and Receptions in a Node

클래스-A의 주요 응용인 원격 센싱은 주기적으로 센서 값을 획득한 후 이를 처리를 한 결과를 게이트웨이로 송신하게 되는데, LoRaEnergySim의 노드의 상태 전환 모델에서 그림 2와 같이 PROCESS 상태는 주기적으로 센서 값을 획득한 후 이를 처리하고 패킷 송신을 시작(terminate)하면 LoRaWAN 컨트롤러에서 패킷 송신에 필요한 과정을 수행하게 되며, 게이트웨이로부터의 응답 패킷의 수신은 RX1 혹은 RX2 윈도우에 임의로 수신될 수 있으며 수신에 성공할 경우 수신된 데이터를 응용 태스크에 전달될 수 있도록 처리하는 POSTRX 상태로 전환되고 해당 패킷에 대한 라운드를 종료한다.

LoRaEnergySim 노드의 상태 전환 모델에서 PROCESS는 주기적으로 수행되어야 하고 POSTRX는 게이트웨이로부터 응답 패킷이 수신되는 경우 수행되어야 하므로 CPU에서 수행되는 응용 태스크는 아니지만 CPU 시간을 사용하므로 본 논문의 태스크 모델에서는 인터럽트 핸들러 형태로 설계하였다.

그림 6은 본 논문에서 설계된 태스크 모델을 나타내며, 노드에서 패킷은 주기적인 타임머 인터럽트에 의해 수행되는 PROCESS 태스크에서 송신할 데이터를 패킷화 하고 LoRaWAN 컨트롤러의 패킷 송신 버퍼에 전달한 후 실행 후 무시(fire-and-forget) 방식으로 송신되고, 게이트웨이로부터 응답 패킷이 수신되면 LoRaWAN 컨트롤러는 이를 패킷 수신 버퍼에 전달한 후 수신 인터럽트를 발생시켜 POSTRX 태스크를 수행하도록 한다.

3. Extensions to ED-H Scheduling Algorithm

본 논문에서 적용하는 ED-H 실시간 스케줄링 알고리즘은 에너지 하베스팅 장치와 같이 에너지 가용성이 동적이고 예측할 수 없는 시스템을 위해 설계되었으며, LoRaWAN 응용에 따라 데이터 전송률, 지연 시간, 에너지 사용량 측면에서 요구사항이 다르기 때문에 ED-H 알고리즘의 태스크의 시급성과 잔여 에너지양에 따른 태스크 스케줄링을 지원함으로써 다양한 시나리오에서 최적의 작동을 보장할 수 있다. 이를 위해 ED-H 스케줄링 알고리즘은 매 타임 슬롯 t 에서 현재 수행 가능한 상태의 모든 태스크에서 마감 시각까지 수행해야 하는 타임 슬롯을 모두 수행하고 남아 있는 유휴 타임 슬롯의 수를 계산하고 가장 작은 값인 $ST_{\tau}(t)$ 를 계산하게 되는데, 본 논문에서는 이러한 유휴 타임 슬롯을 LoRaWAN 태스크인 PROCESS와 POSTRX를 수행하는데 활용한다.

이때 인터럽트 동작 매커니즘에 따라 인터럽트가 꺼져 있지 않으면 CPU에서 수행되는 응용 태스크는 인터럽트 핸들러에 의해 선점되어 핸들러의 수행이 완료될 때까지 일시적으로 중지되기 때문에, ED-H 스케줄링 알고리즘에 의해 해당 타임 슬롯에 수행되지 않으면 시간 제약을 만족하지 못하는 경우가 발생하게 된다.

따라서 본 논문에서는 그림 7과 같이 ED-H 스케줄링 알고리즘을 확장하여 매 타임 슬롯에서 최악의 경우에도 모든 응용 태스크의 시간 제약을 만족하도록 LoRaWAN 태스크 중 가장 수행시간이 긴 태스크의 타임 슬롯 점유 기간 LP_{max} 을 계산하고 매 타임 슬롯에 이를 수용할 수 있는 유휴 타임 슬롯 여부를 확인한 후 인터럽트를 허용한다.

또한 인터럽트가 허용되었을 경우 그림 6과 같이 응용 태스크가 수행되는 중에서 LoRaWAN 태스크가 수행될 수

있고 유휴 타임 슬롯이 충분하지 않은 경우 인터럽트가 꺼져 있어 타이머나 수신 인터럽트가 LoRaEnergySIM 노드에 의해 발생하여도 수행이 지연되어 ED-H 스케줄링 알고리즘에 의해 유휴 타임 슬롯이 확보되어 인터럽트가 허용되었을 때 즉시 수행되도록 한다.

```

LPmax = the maximum execution time for LoRaWAN tasks
STτ(t) = remaining time slots after executing
tasks release and finished within (t,d), where d
is a deadline

interrupt RX:
  move the received packet to buffer
  raise a flag for bottom-half

interrupt Timer:
  move a packet to buffer for transmission
  initiate a transmission

foreach clock t:
  if STτ(t) < LPmax then
    disableIRQ()
  else
    enableIRQ()
    ED-H_schedule(t)
  
```

Fig. 7. Proposed ED-H Scheduling Algorithm Extension

IV. Evaluations

본 논문에서 구현한 ED-H 스케줄링 알고리즘과 LoRaEnergySim 시뮬레이션 연동을 통해 배터리가 없는 에너지 하베스팅 기반의 LoRaWAN 클래스-A 단말기에서 ED-H 스케줄링 알고리즘의 적용 가능성을 검증하기 위해 그림 8의 게이트웨이와 노드의 배치와 같이 LoRaEnergySim 연구[2]에서 사용된 동일한 실험 환경을 사용하였고 각 노드의 패킷에 따른 상태별 소요 시간과 소비전력 로그를 추출하였다.

ED-H 스케줄링 알고리즘에서 사용되는 슈퍼 커패시터가 결합된 태양광 기반의 에너지 하베스트 시스템에 의한 전력 공급 파라미터 설정을 위해서 표 3과 같이 다양한 에너지 하베스터 장치와 보조 전원 저장장치를 지원하는 e-peas 사의 AEM10941 지능형 전력 관리 장치의 설정값을 사용하였다[15]. 시뮬레이션 연동을 통해 임의의 패킷의 로그를 추출하여 응용 태스크의 CPU 점유율이 10%에서 90%까지 조절을 하면서 본 논문에서 제안한 그림 7의 확장형 ED-H 스케줄링 알고리즘에 적용하고 [15]의 시나리오에서 발생할 수 있는 다양한 송수신 패킷에 대해 상호 시뮬레이션을 수행하였다.

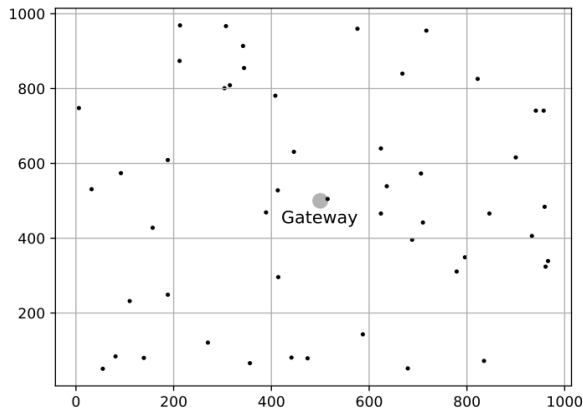


Fig. 8. LoRaEnergySim Deployment

Table 3. Power Model in the Experiment Setup

Item	Feature	Unit
LL200	Solar Panel for Power Generation	0.449mW under 1000 Lux (outdoor)
GS209	Super-Capacitor for Energy Storage	204mF at 5.0V (1.125J)

수신 패킷의 수신 성공율에 영향을 미칠 수 있는 RX 윈도우의 경우 LoRaEnergySim과의 비교를 위해 해당 시뮬레이션 결과가 제시된 [2]의 RX 윈도우 값과 동일하게 RX1의 경우 LoRaWAN 클래스-A에서 일반적으로 사용되는 값인 1000ms로 설정하였으며, RX2의 경우 LoRaWAN 클래스-A 표준에 따라 1000ms에서 RX1의 수행 시간을 뺀 값을 사용하였다.

그림 9와 그림 10은 RX2 윈도우에 응답 패킷이 수신되는 로그에 대해 응용 태스크의 CPU 점유율이 각각 20%와 80%인 경우 대해 시뮬레이션 결과를 도식화한 것이다. 상단의 SUPERCAP으로 표기된 그래프는 슈퍼 커패시터의 에너지 잔량을 줄(Joule) 단위로 타임 슬롯에 대해 도식화하였고, 하단의 LoRaWAN TASK, LoRaWAN CONTROLLER, (Application) TASK는 그림 6의 태스크 모델의 각 항목의 에너지 소비량을 줄 단위로 타임 슬롯에 대해 도식화하였다.

그림 9와 그림 10의 시뮬레이션 결과에 따르면 ED-H 스케줄링 알고리즘은 시간 제약성을 만족하기 위해 CPU 점유율이 낮은 경우에 비해 높은 경우 에너지를 보다 자주 보충하여 에너지가 고갈되지 않는 한 태스크의 시급성을 우선하여 사용하는 것을 확인하였다.

CPU 점유율에 따른 슈퍼 커패시터의 에너지 잔량에 대한 영향을 확인하기 위해 그림 11과 같이 CPU 점유율을 10%에서 90%까지 10% 단위로 증가하면서 에너지 잔량을 수집하였으며 시뮬레이션 결과에 따라 ED-H 알고리즘이

정상적으로 동작하여 그림 9와 그림 10의 시뮬레이션 결과와 일관되게 관찰되었으며, 그림 11에서 에너지 잔량의 최소값, 최대값 및 평균값에 있어서 CPU 점유율에 따른 변화가 제한적인 것으로 확인하였다.

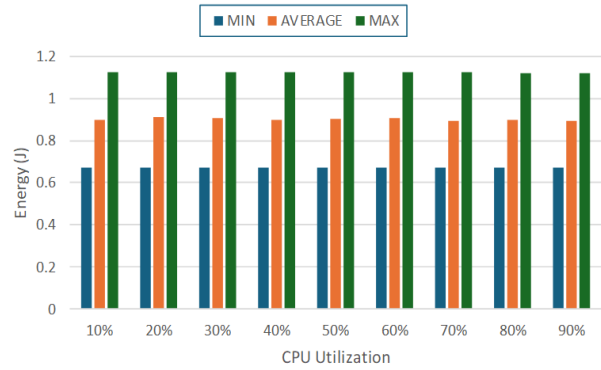


Fig. 11. Energy Remaining in Super-Capacitor

V. Conclusions

본 논문은 주로 지리적으로 분산된 위치에서 데이터를 수집하고 원격 자산을 모니터링하는데 사용되는 LoRaWAN 클래스-A 단말기에 적합한 태양광 패널과 슈퍼 커패시터가 결합된 에너지 하베스트 시스템을 전원 공급 장치로 사용하는 대규모 LoRaWAN 환경에서 무선 패킷의 시간 및 에너지 특성을 분석하기 위해 LoRaEnergySim 시뮬레이터와 ED-H 실시간 스케줄링 알고리즘을 연동하기 위한 상호 시뮬레이션 기법을 설계하고 구현하였다.

본 논문에서 제안한 기법의 적용 가능성을 확인하기 위해 LoRaEnergySim 시뮬레이션 결과가 제시된 동일 환경에서 LoRaWAN 클래스-A의 패킷 송수신이 수행되는 것과 동시에 다양한 시간과 에너지 특성을 갖는 태스크 집합에 대해 ED-H 스케줄링 알고리즘을 수행하여 시간 제약성을 만족하며 단말기에서 CPU와 LoRaWAN에서 사용되는 시간과 소비되는 에너지를 분석함으로써 본 논문에서 제안한 상호 시뮬레이션 기법의 적용 가능성을 확인하였다.

향후 연구과제로 LoRaWAN 관련 국내 표준인 LBT (Listen-Before-Talk) 미디어 제어 방식[6]을 구현하여 기존의 본 논문에서 다루었던 듀티 사이클 기반의 방식과 무선망 효율성과 단말기의 소비전력 면에서 비교할 예정이다.

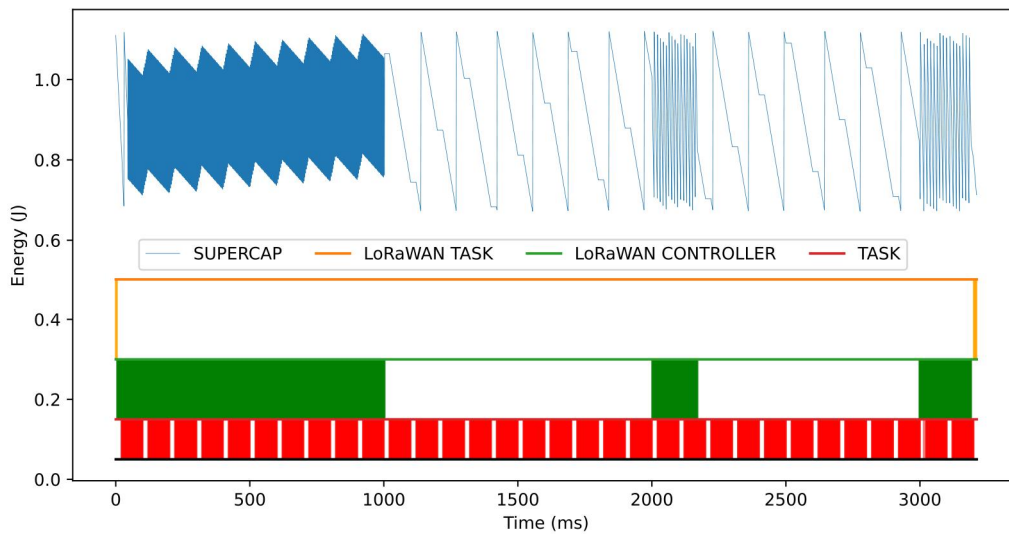


Fig. 9. Task Scheduling Results with Energies in Super-Capacitor (CPU Utilization: 80%)

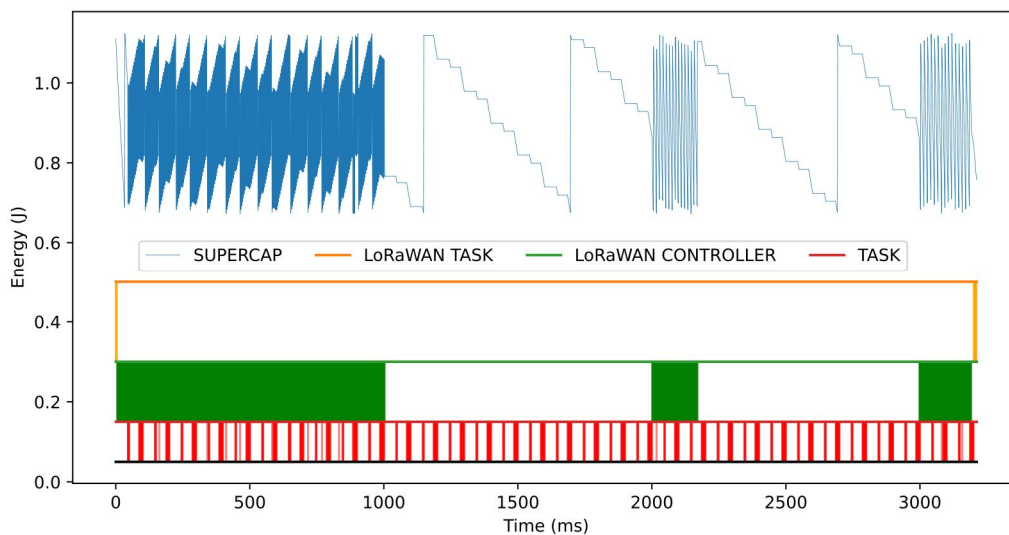


Fig. 10. Task Scheduling Results with Energies in Super-Capacitor (CPU Utilization: 20%)

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2021R1F1A1050088).

REFERENCES

- [1] G. Saha, R. Singh, and S. Saini, "A Survey Paper on the impact of 'Internet of Things' in Healthcare," Proceedings of the 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, pp. 331-334, 2019.
- [2] G. Callebaut, G. Ottoy, and L. van der Perre, "Cross-Layer Framework and Optimization for Efficient Use of the Energy Budget of IoT Nodes," Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 1-6, 2019.
- [3] G. Callebaut, G. Ottoy and L. V. d. Perre, "Optimizing Transmission of IoT Nodes in Dynamic Environments," Proceedings of the International Conference on Omni-layer Intelligent Systems, pp. 1-5, 2020.
- [4] F. Deng, X. Yue, X. Fan, S. Guan, Y. Xu, and J. Chen, "Multisource Energy Harvesting System for a Wireless Sensor Network Node in the Field Environment," IEEE Internet of Things Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 918-927, February 2019. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2865431
- [5] T. Karunathilake, A. Udugama and A. Forster, "LoRa-DuCy: Duty Cycling for LoRa-Enabled Internet of Things Devices,"

Proceedings of the Twelfth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, pp. 283-288, 2021.

- [6] J. Ortin, M. Cesana and A. Redondi, "Augmenting LoRaWAN Performance With Listen Before Talk," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 18, No. 6, pp. 3113-3128, June 2019. DOI: 10.1109/TWC.2019.2910512
- [7] M. Chetto, "Optimal Scheduling for Real-Time Jobs in Energy Harvesting Computing Systems," IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, Vol. 2, No. 2, pp. 122-133, January 2014. DOI: 10.1109/TETC.2013.2296537
- [8] LoRaEnergySim, <https://github.com/GillesC/LoRaEnergySim>
- [9] T. Yonghong and X. Yin, "A Dynamic Scheduling Algorithm for Energy Harvesting Embedded Systems." EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol. 2016, No. 114, pp. 1-8, April 2016, DOI: 10.1186/s13638-016-0602-8.
- [10] M. Chetto, "Task Scheduling In Energy Harvesting Real-time Embedded Systems," Journal of Information Technology & Software Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 1-2, September 2012. DOI: :10.4172/2165-7866.1000e106
- [11] F. Sangoleye, N. Irtija, and E. Eleni Tsiropoulou, "Smart Energy Harvesting for Internet of Things Networks," Sensors, Vol. 21, No. 8, pp. 1-19, April 2021. DOI: 10.3390/s21082755
- [12] M. Karimi, Y. Wang, Y. Kim, Y. Lim, and H. Kim, "CARTOS: A Charging-Aware Real-Time Operating System for Intermittent Batteryless Devices," arXiv, November 2023, DOI: 10.48550/arXiv.2311.07227
- [13] S. Maudet, G. Andrieux, R. Chevillon, and J. Diouris, "Refined Node Energy Consumption Modeling in a LoRaWAN Network," Sensors, Vol. 21, No. 19, pp. 1-24, September 2021. DOI: 10.3390/s21196398
- [14] F. Correia, S. Silva, F. Carvalho, M. Alencar, K. Assis, and R. Bacurau, "LoRaWAN Gateway Placement in Smart Agriculture: An Analysis of Clustering Algorithms and Performance Metrics," Energies, Vol. 16, No. 5, pp. 1-21, March 2023. DOI: 10.3390/en16052356.
- [15] E-Peas, "AEM10941 Evaluation Kit with PowerFilm Flexible PV Cell and CAP-XX Supercapacitor User Guide," 2023.

Authors



Sangsoo Park received the BS degree in Computer Science from Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea, in 1998, and the MS and PhD degrees in Computer Science & Engineering

from Seoul National University, Seoul, Korea, in 2000 and 2006, respectively. Dr. Park joined the faculty of the Department of Computer Science & Engineering at Ewha Womans University, Seoul, Korea, in 2009. He is currently a Professor in the Department of Computer Science & Engineering, Ewha Womans University. He is interested in real-time embedded systems and system software.