

# 저전력 손실 네트워크에서 노드 연결성 향상을 위한 EC-RPL<sup>+</sup>

## (EC-RPL to Enhance Node Connectivity in Low-Power and Lossy Networks)

정재담<sup>1)</sup>, 홍석원<sup>2)</sup>, 김영수<sup>3)</sup>, 유성은<sup>4)</sup>\*

(Jeadam Jung, Seokwon Hong, Youngsoo Kim, and Seong-eun Yoo)

**요약** IETF(Internet Engineering Task Force)는 저전력 손실 네트워크 환경인 LLNs(Low power and Lossy Networks)의 라우팅 프로토콜로 RPL(IPv6 Routing Protocol for Low-power Lossy Network)을 표준화하였다. RPL은 LLNs에서 요구하는 서비스에 적합한 OF(Objective Function)를 통해 경로를 생성하고 DODAG(Destination Oriented Directed Acyclic Graph)를 구축한다. 기존 연구들은 각 노드의 잔여 에너지를 확인하여 잔여 에너지가 높은 부모를 선택하여 DODAG를 구축하지만 실제 부모 노드가 에너지를 전부 소모하기 전에 DODAG를 떠나고 새로운 DODAG를 구축하는 방식은 없었다. 따라서 본 논문에서는 DODAG에 가입된 노드의 에너지 잔량이 지정된 에너지 한계점 이하로 떨어지면 그 노드가 DODAG를 미리 떠나는 EC-RPL(Enhanced Connectivity-RPL)을 제안한다. 제안된 프로토콜을 오픈소스 사물인터넷 운영체제인 Contiki에서 제공하는 Cooja 시뮬레이터를 사용하여 그 성능을 평가하고 Foren6를 활용하여 제어 메시지 수를 비교한다. 실험 결과 EC-RPL이 기존 RPL 보다 6.9% 낮은 지연시간과 5.8% 낮은 제어 메시지를 사용하며, 패킷 전달 비율은 1.7% 높은 것을 확인할 수 있다.

**핵심주제어:** EC-RPL, RPL, 에너지 효율적인, 사물인터넷, 저전력 손실 네트워크

**Abstract** The Internet Engineering Task Force (IETF) has standardized RPL (IPv6 Routing Protocol for Low-power Lossy Network) as a routing protocol for Low Power and Lossy Networks (LLNs), a low power loss network environment. RPL creates a route through an Objective Function (OF) suitable for the service required by LLNs and builds a Destination Oriented Directed Acyclic Graph (DODAG). Existing studies check the residual energy of each node and select a parent with the highest residual energy to build a DODAG, but the energy exhaustion of the parent can not avoid the network disconnection of the children nodes. Therefore, this paper proposes EC-RPL (Enhanced Connectivity-RPL), in which a node leaves DODAG in advance when the remaining energy of the node falls below the specified energy threshold. The proposed protocol is implemented in Contiki, an open-source IoT operating system, and its performance is evaluated in Cooja simulator, and the number of control messages is compared using Foren6. Experimental results show that EC-RPL has 6.9% lower latency and 5.8% fewer control messages than the existing RPL, and the packet delivery rate is 1.7% higher.

**Keywords:** EC-RPL, RPL, Connectivity, IoT, LLNs

\* Corresponding Author: seyoo@daegu.ac.kr

+ 이 논문은 2021년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1F1A1048179)

Manuscript received August 19, 2022 / revised

November 11, 2022 / accepted November 18, 2022

1) 대구대학교 ICT융합학부, 제1저자  
2) 대구대학교 AI학부, 제2저자  
3) 전주대학교 인공지능학과, 제3저자  
4) 대구대학교 AI학부, 교신저자

### 1. 서론

최근 스마트 팩토리(Lee and Yoo, 2020), 차량 간 네트워크, 스마트 홈, 지능형 빌딩(Jung and Yoo, 2022)과 같은 다양한 분야에서 사물인터넷이 확산되고 있다. 사물인터넷은 사물들이 네트워크에 연결되어 정보를 서로 주고받을 수 있는 네트워크를 말하며 메모리, 에너지 등이 제한적인 환경에서 구현되는 네트워크(Yoo, 2012; Cui and Kang, 2020; Kim et al., 2022)를 저전력 손실 네트워크(Low power and Lossy Networks, LLNs)라고 한다. IETF(Internet Engineering Task Force)에서는 인터넷 표준화를 위해서 여러 표준을 제안하였다. IETF ROLL 워킹그룹에서 산업, 가정, 도시 환경을 고려하여 자원 제약적인 장치에 적합하도록 저전력 손실 네트워크를 위한 라우팅 프로토콜인 RPL(IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks)을 2012년에 RFC 6550 문서로 표준화하였다. RPL은 목적함수를 사용하여 루트 노드로부터 상대적인 거리를 나타내는 메트릭을 계산하고 이를 이용하여 루트 노드로 향하는 트리 형태의 방향성 비순환 그래프(Destination Oriented Directed Acyclic Graph, DODAG)를 구성하며 최종적으로 각 노드를 루트 노드로 연결한다.

기존 RPL에서는 DODAG에 가입된 노드가 고장이 나거나 에너지를 전부 소진하게 되면 노드는 DODAG를 떠나게 된다. 하지만 통신이 끊김 없이 유지되어야 하는 상황, 즉 자연재해 경보기, 조난자 신호 수신기, 드론 감지기 등의 상황에서는 짧은 시간의 통신의 끊어짐이 심각한 문제로 이어질 수도 있을 것이다. 따라서 DODAG를 구성하는 노드의 에너지 잔량을 확인하고 노드의 에너지가 설정한 에너지 한계점 이하라면 노드가 에너지를 전부 소진하기 전에 노드가 DODAG에서 떠나고 새로운 DODAG를 구축하여 통신을 유지하는 EC-RPL (Enhanced Connectivity - RPL)을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 RPL의 개요 및 관련 연구들을 살펴보고 3장에서는 제안하는 EC-RPL에 대하여 상세히 설명한다. 4

장에서는 EC-RPL의 성능을 Cooja 시뮬레이터를 이용하여 평가 및 분석한다. 5장에서는 본 논문을 요약하며 결론을 내린다.

### 2. 관련 연구

본 장은 RPL 표준에 대한 소개로 시작하여, 관련 연구를 분석하며 문제점과 한계를 설명한다.

#### 2.1 RPL 개요

RPL은 링크 비용 및 노드 정보를 고려한 DODAG를(Fig. 1) 형성한다. DODAG은 하나의 root 노드를 기반으로 하며 주변 노드에게 랭크(rank)를 부여하고 랭크를 기준으로 네트워크를 구축한다. 노드의 랭크 계산은 해당 RPL에서 사용되는 목적함수에 의해 결정된다. IETF에서는 OF0(Object Function zero)와 MRHOF(Minimum Rank with Hysteresis Objective Function)라는 두 가지 목적함수를 RFC 문서로 표준화하였다. RPL은 Coniki, TinyOS, OpenWSN 등의 사물인터넷 오픈소스 운영체제에 구현되어 있다.

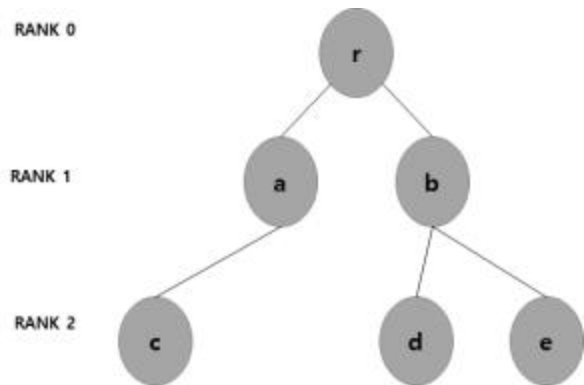


Fig. 1 DODAG

OF0에서 랭크는 DODAG 루트 노드를 기준으로 홉을 기반으로 계산되어 노드들은 최단 경로 라우팅을 형성하고 MRHOF는 패킷을 오류 없이 전송하는 데 필요한 예상 전송 횟수인

ETX (Expected Transmission Count)를 기본으로 사용하여 랭크를 계산한다. 네트워크 품질 측면에서 신뢰성은 MRHOF가 우수하고 낮은 전력과 빠른 연결에 대해서는 OF0가 우수하다.

RPL의 제어 메시지는 DIO(DODAG Information Objects), DIS (DODAG Information Solicitation), DAO (Destination Advertisement Object), DAO-ACK 4가지가 있다. DIO 메시지는 랭크, Instance ID, Version Number 등의 RPL을 구성하는 주요 정보들이 포함된 메시지로 각 노드에 주기적으로 브로드캐스팅되어 상향 경로를 유지한다. DIS 메시지는 이웃 노드에게 브로드캐스팅되어 DIO 메시지를 요청한다. DAO 메시지는 노드가 선호 부모를 선택한 후 선호 부모에게 자신의 정보를 넣은 DAO 메시지를 전송하면 부모는 DAO 메시지에서 자신의 ID를 업데이트한 후 루트 노드까지 유니캐스트하여 하향 경로를 유지한다. DAO-ACK는 DAO 메시지에 대한 확인 응답으로, 루트 노드가 DAO 메시지를 받으면 DAO 메시지를 보낸 노드에게 유니캐스트된다.

### 2.2 DODAG 가입

노드에 전원이 인가되어 DODAG에 가입하는 방법에는 다음과 같이 두 가지(Fig. 2, Fig. 3)가 있다.

Fig. 2는 DODAG에 가입하고자 하는 노드가 DIO 메시지를 수신하기를 기다려서 동작하는 모드에 대한 예시이다. DODAG에 가입하려는 신규 노드 n이 주위 노드로부터 DIO 메시지를 수신하면 DIO 메시지에 있는 OF로부터 자신의 랭크를 계산하고, 부모 리스트를 탐색하여 최적의 부모를 찾는다. 노드 n이 선택한 노드 2에게 자신의 정보가 담긴 DAO 메시지를 보낸다. 노드 n에게 DAO 메시지를 받은 노드 2는 자신의 부모 노드 r에게 자신의 ID를 추가한 DAO 메시지를 보낸다. DAO 메시지가 루트 노드까지 전달되도록 이 과정이 반복된다. DAO 메시지를 받은 루트 노드는 새로운 노드가 DODAG에 가입하였음을 알게 되고 DIO 메시지 필드에 있는 기존 DODAG\_version을 올린다.

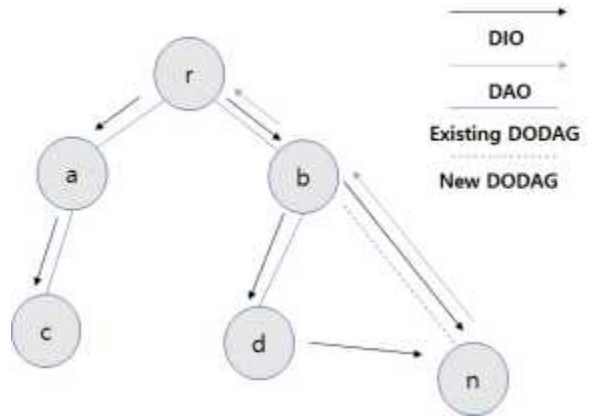


Fig. 2 a new node, n waits for DIO messages in a silent mode

Fig. 3은 DODAG에 가입하고자 하는 신규 노드 n이 근처 노드의 정보를 획득하기 위하여, DIS 메시지를 전송하는 모드에 대한 예시이다. 신규 노드 n은 DIS 메시지를 브로드캐스트하고 근처 노드들은 DIO 메시지로 응답한다. 이렇게 신규 노드 n이 DIO 메시지를 받으면, 앞에서 설명한 것과 동일한 방식(Fig. 2)으로 DODAG에 가입한다.

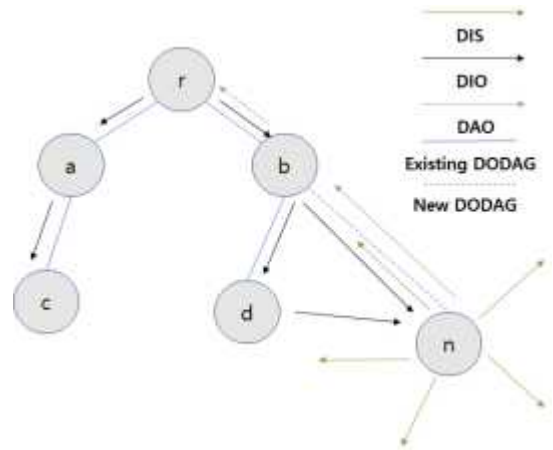


Fig. 3 a new node, n sends one or more DIS messages

### 2.3 RPL 관련 연구

Khelifi and Oteafy et al.(2015)가 제안한 P-RPL (Proactive-RPL)에서는 각 부모 노드의

고통 지수를 계산하고 고통 지수가 낮은 노드를 부모 노드로 선택하여 DODAG를 구현 및 유지한다. 그러나 링크 상태가 좋은 상위 노드에 다수의 하위 노드들이 몰리게 되면 상위 노드의 에너지가 빠르게 소진되는 문제점이 있다.

Lamaazi and Benamar(2018)이 제안한 OF-EC에서는 잔여 에너지를(초기 에너지- 노드가 사용한 에너지) 계산하여 계산된 랭크 값을 DIO 메시지 필드에 보냄으로써 잔여 에너지가 높은 노드를 선호 부모로 선택하여 DODAG를 구축한다. 그러나 위 연구에서 잔여 에너지가 많은 노드가 링크 상태가 좋지 않다면 노드의 에너지를 빠르게 소진하여 네트워크의 수명이 빠르게 줄어드는 문제점이 있다.

Yang and Zhutian et al.(2017)이 제안한 Green-RPL에서는 각각의 노드들이 DIO 메시지를 수신할 때 우선순위를 지정한다. 노드가 정의된 시간 동안 이웃 노드로부터 DIO 메시지를 수신하지 않으면 해당 노드를 삭제하고 새로운 DIO 메시지를 수신하여 DODAG를 업데이트하고 유지한다. 그러나 네트워크 환경이 좋지 않아 노드를 자주 삭제하고 다시 DODAG를 형성하는 것은 노드의 에너지를 빠르게 줄인다는 단점이 있다.

Kim and Jeong(2019)이 제안한 NBC-RPL(Node Balanced CNC-RPL)은 부모 노드가 자식 노드를 가질 수 있는 최대 수를 정하고 그 이상의 노드가 연결되지 않도록 자식 노드를 나눠 가질 수 있도록 하여 트래픽이 한 곳에만 집중되지 않도록 DODAG를 구축한다. 그러나 새로 가입하는 노드와 부모 노드의 거리가 멀다면 링크 효율이 떨어질 수 있는 문제점이 있다.

Lee and Yoo(2019)가 제안한 ADP-RPL(Adaptive RPL)에서는 랭크 값의 증가와 부모의 변경 시간을 고려하여 링크 품질의 악화를 판단하여 랭크 값에 반영하여 불안정한 노드를 부모 노드로 선택하지 않고 링크가 좋은 부모 노드를 선택하여 DODAG를 구축한다. 또한, Touzene and Abderezak et al.(2020)이 제안한 ETX-ENR에서는 DODAG에 가입하는 노드는 각각의 ETX, 에너지를 계산하고 계산한 두 값을 더하여 더 낮은 랭크를 가지는 노드를 선호

부모 노드로 선택하여 DODAG를 구축한다. 그러나 위 두 연구에서는 부모 노드의 에너지가 전부 소진한 경우에도, 자식 노드가 이러한 부모 노드에게 패킷을 보낼 수 있으며, 이 경우 해당 패킷이 손실되는 문제가 나타날 수 있다.

위에서 설명한 관련 연구들 모두 에너지를 전부 소모한 노드를 제외한 새로운 DODAG를 구축하기 위해 일정 시간 네트워크 연결성이 끊어지는 문제점을 가지고 있다. 따라서 노드 에너지 고갈로 새로운 버전의 DODAG를 구축하는데 일정 시간 네트워크 연결성이 끊어지는 기존 RPL의 문제를 해결하고자 본 연구에서는 EC-RPL을 제안한다.

### 3. EC-RPL(Enhanced Connectivity -RPL)

EC-RPL은 DODAG에 가입되어있는 각 노드의 에너지 잔량을 확인하고 노드가 지정한 에너지 한계점 이하라면 그 노드는 DODAG에서 떠나고 새로운 버전의 DODAG를 구축하는 것을 목적으로 한다. 노드의 에너지 잔량을 확인하는 방법은 (초기 에너지) - (소비 에너지)로 나타내며 RPL에서 노드는 에너지를 0(최소) ~ 255(최대) 사이의 값으로 가진다.

기존 RPL은 노드가 에너지를 전부 소진하면 즉, 노드의 에너지가 0이 된다면 DODAG에서 떠나게 된다. 그렇게 된다면 네트워크는 갑작스럽게 통신이 끊어지는 상황이 발생할 것이다. 따라서 노드의 에너지 한계점을 정해 노드의 잔여 에너지가 에너지 한계점 이하로 떨어지게 된다면 미리 DODAG를 떠나게 된다면 이 문제를 해결할 수 있을 것이다.

본문에서는 에너지 한계점을 3으로 선정하였고 그 이유는 노드가 패킷을 보내는 도중 노드가 에너지를 전부 소진하는 경우가 발생할 수 있으므로 너무 낮은 에너지 잔량인 1이나 2는 에너지 한계점으로 선정하지 않았다. 반대로 에너지 한계점을 너무 높게 지정할 경우 오히려 DODAG를 구축하는 네트워크의 수명이 짧아지는 문제가 발생할 것이다. 아래의 Fig. 4는 EC-RPL의 활용 예시를 보여준다.

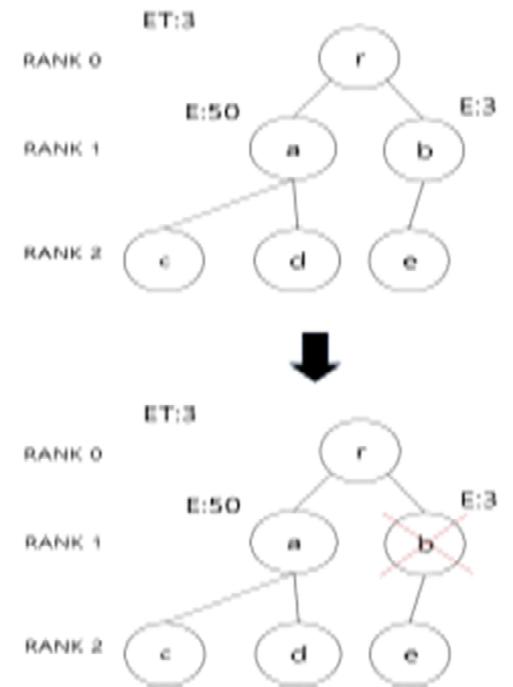


Fig. 4 EC-RPL Operation Scenario

Fig. 4에서 b 노드의 에너지 잔량이 지정된 에너지 한계점인 3 이하가 되어서 b 노드는 DODAG에서 떠나고 새로운 버전의 DODAG를 형성하는 시나리오를 그림으로 나타낸 것이다. 이 방법을 사용하게 되면 에너지를 전부 소진한 노드에게 전송되어 낭비되는 제어 메시지 및 패킷을 줄일 수 있으며, 갑작스럽게 네트워크 연결성이 끊어지고 새로운 버전의 DODAG를 형성하는데 필요한 시간을 줄일 수 있다. 즉, 노드의 잔여 에너지 잔량이 지정된 에너지 한계점 이하라면 노드는 DODAG를 떠나고 남은 노드들로 새로운 버전의 DODAG를 형성한다.

Fig.5는 EC-RPL의 Flowchart를 나타낸 것으로 각 노드가 DIO 메시지를 받을 때마다 노드 자신의 잔여 에너지를 확인하고 만약 노드의 잔여 에너지가 지정된 에너지 한계점 이하라면 노드는 루트 노드에게 DAO 메시지를 전달하고 DODAG를 떠나게 되고 나머지 노드들은 새로운 버전의 DODAG를 구축한다. 그러나 노드의 잔여 에너지가 지정된 에너지 한계점 이하가 아니라면 현재 DODAG를 유지한다.

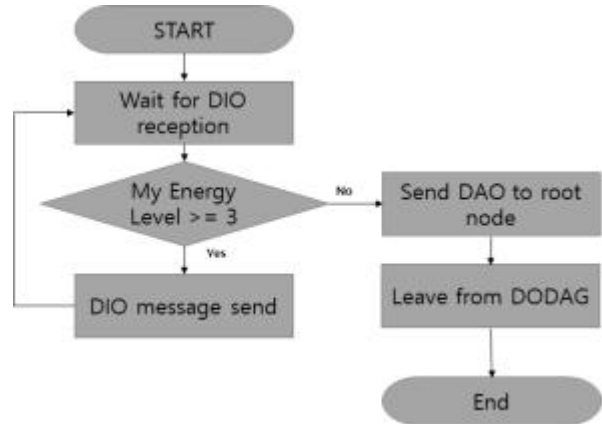


Fig. 5 EC-RPL Flowchart

노드의 잔여 에너지가 에너지 한계점 이하가 되지 않는다면 기존 RPL 그대로 DODAG를 형성 및 유지하게 된다. 따라서 상황에 맞는 목적 함수를 사용하여 DODAG를 형성 및 유지하되 노드의 잔여 에너지가 에너지 한계점 이하라면 미리 DODAG를 떠나 네트워크 연결성을 유지할 수 있을 것이다.

상기한 바와 같이 EC-RPL은 노드가 에너지를 전부 소진하기 전에 미리 루트 노드에게 노드 자신이 DODAG에서 떠난다는 것을 알려주고 난 뒤 DODAG에서 떠나고 남은 노드들이 새로운 버전의 DODAG를 형성한다. 이를 통해 DODAG를 형성하는 노드가 에너지를 모두 소진했을 경우 자식 노드가 에너지를 모두 소모한 노드에게 보냄으로써 낭비될 수 있는 응용 패킷과 RPL 제어 메시지 수를 줄일 수 있다.

#### 4. 성능 평가

본 장에서는 RPL과 EC-RPL의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션 모델을 설명하고 그 결과를 분석한다.

##### 4.1 실험 환경설정

실험 환경은 Contiki, Cooja 시뮬레이터, 6LoWPAN 네트워크 분석기인 Foren6를 사용한

다. Contiki는 ContikiMAC, CoAP, 6TiSCH, RPL 등의 저전력 무선 네트워크 프로토콜을 제공하는 IoT를 위한 오픈소스 사물인터넷 운영 체제이다. Cooja는 센서 네트워크를 시뮬레이션하기 위한 시뮬레이터로 Contiki를 하드웨어로 이식하기 전에 시뮬레이션하여 실제 환경과 비슷하게 시뮬레이션하여 문제점을 미리 확인해 볼 수 있다. Foren6는 스니퍼를 활용하여 6LoWPAN 네트워크 정보를 시각적으로 표현해주는 애플리케이션으로 RPL의 제어 메시지의 수를 확인할 수 있다.

Topology는 root 노드 1개와 일반 노드 20개로 이루어진 환경을 구축하였고 모든 노드의 초기 잔여 에너지는 7을 기준으로, 시뮬레이션 타임은 기존 RPL은 3600초를 기준으로, EC-RPL은 노드가 에너지를 전부 소진하기 전에 미리 DODAG를 떠나므로 기존 RPL과 패킷 수를 비슷하게 맞추기 위해서 3800초를 기준으로 시뮬레이션하였다. 아래 Fig. 6은 시뮬레이션 Topology를 나타낸 것이다.

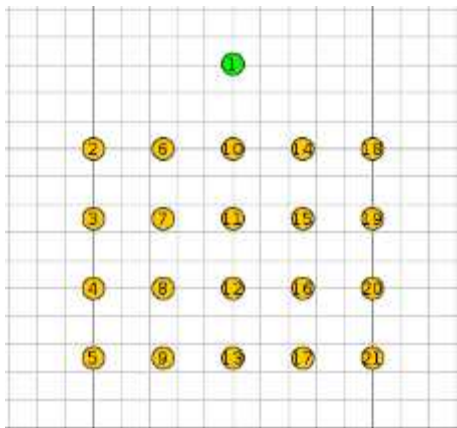


Fig. 6 Simulation Topology

시뮬레이션에서 사용되는 디바이스로는 zolertia사의 z1을 사용하고 시뮬레이션 송수신 성공률은 TX, RX를 전부 100%로 설정하게 되면 손실되는 패킷이 나오지 않고 실제 환경에서도 이러한 상황은 발생할 수 없으므로 임의로 TX 80%, RX 100%으로 설정하였다. 기존 RPL과 제안한 EC-RPL의 성능을 검증하기 위해서 UDP 서버 & 클라이언트 애플리케이션을 사용

해서 노드에서 수집한 결과를 살펴보고 Foren6을 사용하여 제어 메시지를 확인한다. Table. 1은 시뮬레이션 구성 환경을 나타낸 것이다.

Table 1 Simulation Environment

Number of Node	21(1 root node, 20 node)
OS	Contiki
Simulator	Cooja
Duty Cycle	ContikiMAC
Device	Zolertia Z1
Radio medium	UDGM(distance loss)
TX Ratio	80%
Rx Ratio	100%

#### 4.2 실험결과 및 분석

본 실험에서는 패킷 전달 비율, 평균 지연시간, 제어 메시지 수를 측정하기 위해서 10번의 시뮬레이션을 진행하였고 시뮬레이션 결과의 평균을 기반으로 기존 RPL과 EC-RPL을 비교하였다. 기존에 연구된 RPL은 목적함수를 사용하여 DODAG를 구축한다. 하지만 EC-RPL에서는 목적함수와 상관없이 노드의 잔여 에너지만으로 DODAG를 떠나는 여부를 결정하므로 결과 비교에 있어 개선된 네트워킹과 기존 RPL의 차이가 근소할 것으로 예상되어 기본 형태의 RPL과 비교하였다.

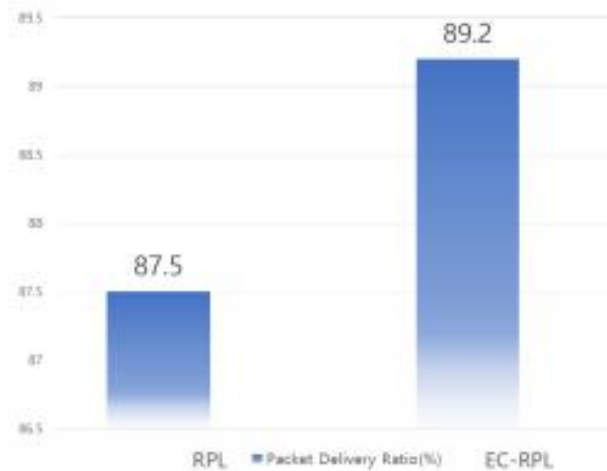


Fig. 7 PDR(Packet Delivery Ratio)

**4.2.1 PDR(Packet Delivery Ratio)**

PDR은 (전체 받은 패킷 / 전체 보낸 패킷) \* 100으로 계산하였으며, 각 노드가 보낸 데이터 패킷이 얼마나 루트 노드에게 전달이 되었는지 측정된 결과를 나타낸다. 에너지가 다한 노드에게 패킷을 보내게 되면 보내지게 된 패킷은 손실된 패킷으로 나타나게 되고 PDR이 높아질 것이다. Fig. 7은 기존 RPL과 EC-RPL의 PDR 비교 결과이며 제안한 방법은 기존 RPL보다 1.7% 높은 PDR을 보인다. 따라서 기존 RPL보다 EC-RPL이 손실되는 패킷의 양이 더 적은 것을 확인할 수 있다.

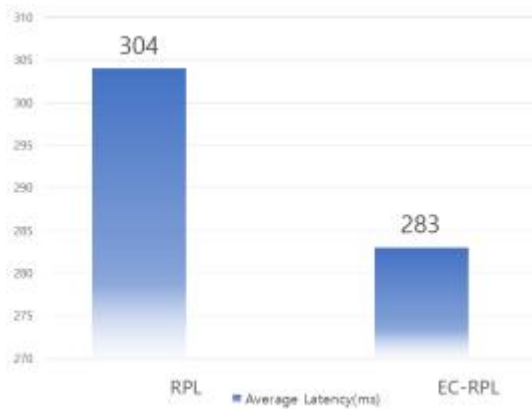


Fig. 8 Average Latency

**4.2.2 Average Latency**

지연시간은 패킷을 목적지 노드로 전달하는데 걸리는 시간을 측정된 것으로 지연시간 = (패킷 수신 시간) - (패킷 송신 시간)으로 계산할 수 있으며 평균 지연시간은 (전체 지연시간) / (전체 받은 패킷)으로 계산된다. 에너지를 전부 소진한 노드에게 패킷을 보내게 되면 에너지를 전부 소모한 노드는 패킷을 받을 수 없고 새로운 DODAG를 형성하고 다시 패킷을 보내게 되므로 패킷을 보내는 시간이 지연되게 된다. 하지만 노드가 에너지를 전부 소진하기 전에 DODAG를 떠나게 되면 패킷을 보내는 시간이 줄어들 것이다. Fig. 8을 보게 되면 제안한 방법이 기존 RPL보다 21ms 낮은 평균 지연시간을 가지는 것을 확인할 수 있다.



Fig. 9 Control message

**4.2.3 Control message**

제어 메시지는 노드들이 DODAG를 형성하거나 유지하기 위하여 필요한 메시지를 말하며 에너지를 전부 소모하여 송수신을 전혀 할 수 없는 부모 노드에게 자식 노드가 제어 메시지를 보낼 수 있다. 하지만 미리 에너지가 얼마 남지 않은 노드가 DODAG에서 떠나면 에너지를 전부 소모한 노드에게 보내는 제어 메시지를 방지할 수 있다. Fig. 9의 결과를 보면 제안한 방법이 기존 RPL보다 제어 메시지 수가 17개 적음을 확인할 수 있다. 따라서 제안한 EC-RPL이 에너지를 전부 소진한 노드를 미리 DODAG를 떠나게 함으로써 제어 메시지 수가 줄어들었다.

**5. 결론**

본 논문에서는 기존 RPL에서 노드가 에너지를 전부 소진하고 새로운 DODAG를 형성 시 짧은 시간 동안 통신이 끊겨 발생할 수 있는 문제를 해결하기 위한 EC-RPL을 구현하고 성능 평가를 진행하였다.

제안된 기법에서는 노드의 현재 에너지를 측정하여 이 값이 정해진 에너지 한계점 이하로 낮아지게 되면 노드가 DODAG에서 떠나고 자식 노드들이 새로운 부모 노드를 찾아 DODAG를 구성하여 연결성을 유지한다. 제안된 EC-RPL을 Cooja 시뮬레이터에서 기존 RPL과 성능 비교 평가한 결과, EC-RPL이 기존 RPL

보다 평균 지연시간이 낮고, 제어 메시지 수 또한 적음을 확인할 수 있고, 패킷 전달 비율 (PDR)은 기존 RPL보다 뛰어남을 확인할 수 있었다.

추후 EC-RPL을 Industrial Shields 사의 하드웨어인 OpenMote-B에 구현하여 그 성능을 평가할 예정이다.

## References

- Adam Dunkels 2003, github, viewed 27 March 2022, <<https://github.com/contiki-os/contiki>>
- CETIC 2013, Foren6, a 6LoWPAN Diagnosis Tool, viewed 31 March 2022, <<https://cetic.github.io/foren6/install.html>>
- Cui, H., & Kang, S. H. (2020). Control Message Transmission Radius for Energy-efficient Clustering in Large Scale Wireless Sensor Networks. *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 25(1), 1-11.
- Gnawali, O., and Levis, P. (2012). RFC 6719: The minimum rank with hysteresis objective function. Internet Engineering Task Force (IETF) Request For Comments.
- Jung, H. and Yoo, S. (2022). GRU-based Adaptive Data Rate Control Algorithm Considering the Mobility of LoRa Devices. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 28(6), 640-647.
- Internet Engineering Task Force 2007, Internet Engineering Task Force , viewed 30 March 2022, <<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4919>>
- Internet Engineering Task Force 2012, Internet Engineering Task Force , viewed 25 March 2022, <<https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6550>>
- Khelifi, N., Oteafy, S., Hassanein, H., & Youssef, H. (2015, August). Proactive maintenance in RPL for 6LoWPAN. In 2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC) (pp. 993-999). IEEE.
- Kim, T. J., and Joung, J. (2019). Node Balanced CNC Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks. *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, 19(5), 123-128.
- Kim, Y. S, Park, Y. S, & Baek, D. K. (2022). High Power Energy Harvesting Systems for IoT Sensor Nodes Systems. *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 27(4), 29-36.
- Lamaazi, H., and Benamar, N. (2018). OF-EC: A novel energy consumption aware objective function for RPL based on fuzzy logic. *Journal of Network and Computer Applications*, 117, 42-58.
- Lee, J. and Yoo, S. (2020). Adaptive ADP-RPL Avoiding Unstable Nodes in Low Power IoT Networks. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 26(2), 92-99.
- Lee, J. and Yoo, S. (2020). Wireless Networked System for Transmission Path Self-Calibration of Laser Equipment. *IEMEK Journal of Embedded Systems and Applications*, 15(2), 79-85. <https://doi.org/10.14372/IEMEK.2020.15.2.79>
- Regents of the University of California 2010, Regents of the University of California, viewed 28 March 2022, <<https://openwsn.atlassian.net/wiki/spaces/OW/overview>>
- TinyOS Alliance 2000, github, viewed 28 March 2022, <<http://www.tinyos.net/>>
- Thubert, P. (2012). Objective function zero for the routing protocol for low-power and lossy networks (RPL).
- Touzene, A., Al Kalbani, A., Day, K., and Al Zidi, N. (2020, June). Performance Analysis of a New Energy-Aware RPL Routing Objective Function for Internet of Things. In 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer



Engineering (ICECCE) (pp. 1-6). IEEE.  
Yoo, S. E. (2012). A Software Framework for Verifying Sensor Network Operations and Sensing Algorithms. Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, 17(1), 63-71.  
Yang, Z., Gu, Y., Wu, Z., Zhao, N., and Wang, X. (2017, September). An energy-efficient routing protocol for cognitive radio enabled AMI networks in smart grid. In 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) (pp. 1-5). IEEE.  
Zolertia S.L. 2003, Zolertia, viewed 26 March 2022, <<https://zolertia.io/>>



**유 성 은 (Seong-eun Yoo)**

- 정회원
- 한양대학교 전자전기공학부 공학사
- 한국과학기술원 정보통신공학과 공학석사
- 한국과학기술원 정보통신공학과 공학박사
- (현재) 대구대학교 AI학부 교수
- 관심분야: IoT Connectivity, Real-time and Embedded Systems



**정 재 담 (Jeadam Jung)**

- 대구대학교 ICT융합학부 졸업
- 관심분야: IoT, 센서 네트워크



**홍 석 원 (Seokwon Hong)**

- 대구대학교 AI학부 AI소프트웨어학과
- 관심분야: IoT, 센서 네트워크



**김 영 수 (Youngsoo Kim)**

- 공군사관학교 전산학과 이학사
- 서강대학교 컴퓨터공학과 공학석사
- 한국과학기술원 정보통신공학과 공학박사
- (현재) 전주대학교 인공지능학과 교수
- 관심분야: 인공지능, 사물인터넷, 지능형 임베디드시스템