

노지 스마트 농장을 위한 초저전력 무선 사물인터넷 네트워크 연구

김우현*, 최승규*, 손일수^o

A Study of Ultra Low Power Internet of Things Networks for Open Field Smart Farms

Woo Hyun Kim*, Seung-Kyu Choi*, Illsoo Sohn^o

요 약

스마트 농업, 스마트 홈, 스마트 빌딩, 스마트 시티에 필요한 사물인터넷을 구현하는 등 무선 메시 네트워크는 그 영역을 점차 확대하고 있다. 이러한 사용 시나리오에서는 무선 사물인터넷 네트워크의 긴 수명이 매우 중요하며, 블루투스 기술 기반의 메시 네트워크가 배터리로 동작하는 저전력 무선 네트워크로서 큰 장점이 있다. 하지만 저전력 블루투스 메시 네트워크에서도 수신대기전력에 의한 에너지 소모가 여전히 상당하며 비동기 동적 스캐닝을 통해 이를 줄이기 노력하고 있다. 본 논문에서는 무선 사물인터넷 네트워크의 수명을 연장시키기 위해 블루투스 메시 네트워크에서 소모 에너지 절감을 연구한다. 비동기 동적 스캐닝 프로토콜에 기반하여 네트워크의 에너지 소모를 수학적으로 모델링하고 에너지 소모에 영향을 주는 주요 네트워크 파라미터를 도출한다. 시뮬레이션을 통해 도출된 주요 네트워크 파라미터가 네트워크의 전력소모에 미치는 영향을 분석하였다.

키워드 : 스마트 농장, 사물인터넷, 블루투스 메시, 초저전력 모니터링 시스템, 에너지 최적화

Key Words : Smart Farm, Internet of Things, BLE mesh, Ultra Low-power Monitoring system, Energy Optimization

ABSTRACT

Wireless mesh networks are gradually expanding their applications enabling the Internet of Things for smart farms, smart homes, smart buildings, and smart cities. In these usage scenarios, the long lifetime of the wireless IoT network is very important, and the Bluetooth technology-based mesh network has a great advantage as a low-power wireless network operated by a battery. However, even in a low power Bluetooth mesh networks, energy consumption due to reception standby power is still significant, and efforts are being made to reduce this through asynchronous dynamic scanning. In this paper, we study energy consumption reduction in a Bluetooth mesh network to extend the lifetime of a wireless IoT network. Based on the asynchronous dynamic scanning protocol, we mathematically model the energy consumption of the network and derive the main network parameters that dominate the energy consumption. Our simulation results analyze the effect of the main network parameters on the power consumption of the network.

※ 본 연구는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2017R1A5A1015596) 및 한국연구재단의 지원(RS-2023-00250168)을 받아 수행된 연구임.

• First Author : Seoul National University of Science and Technology Department of Computer Science, kwh971208ok@seoultech.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Seoul National University of Science and Technology, Department of Computer Science, isohn@seoultech.ac.kr, 중신회원

* Seoul National University of Science and Techonlogy Department of Computer Science, 정회원

논문번호 : 202307-145-0-SE, Received June 14, 2023; Revised September 6, 2023; September 19, 2023

1. 서론

최근 컴퓨터 기술의 급속한 발전으로 인해 기존의 텍스트 위주의 사용자 환경에서 벗어나 이미지, 그래픽, 오디오 및 비디오 데이터 등을 제공하는 멀티미디어 사용자 환경으로 변화하고 있다.

무선통신 기술의 발달로 무선 센서 네트워크는 스마트 농장, 산불 감지와 같은 재난 알림 시스템, 스마트 빌딩, 스마트 홈, 스마트 팩토리, 스마트 시티와 같은 다양한 사물인터넷(Internet-of-Things, IoT) 분야에 적용이 가능하다¹⁶⁾. 위와 같은 사용 시나리오에 무선 센서 네트워크 기술을 적용하려면 저전력 소비, 장치간 쉬운 연결 등을 고려해야 한다. 이러한 요구사항에 적합한 근거리 무선통신 기술로서 Bluetooth Low Energy(BLE)가 후보기술로 유용하게 적용될 수 있다. 하지만 전통적인 BLE는 최대 전송거리가 100m 정도이고 물리적 장애물이나 주파수 간섭 등의 요인으로 인해 실제 사용 거리는 10-20m로 더 짧기 때문에 스마트 홈, 스마트 빌딩 등의 새로운 분야에 바로 적용하기 어렵다⁷⁾. BLE의 단점을 해결하기 위해 2017년, Bluetooth SIG에서는 Bluetooth Mesh(BM) 네트워크를 개발하였다^{8,9)}. BM 네트워크는 복수의 노드들을 릴레이 형식으로 거쳐 데이터 전달이 가능하므로 데이터 전송 거리를 기존 BLE보다 비약적으로 늘릴 수 있게 되었다. 또한 네트워크의 높은 신뢰성을 바탕으로 노드가 많은 곳에서 효과적이고 안전한 통신이 가능하게 되었다.

그림 1은 무선 사물인터넷 네트워크가 결합된 스마트 농장 시나리오를 나타낸다. 스마트 농장을 구현하기 위하여 온도 센서, 습도 센서에서 수집한 정보를 게이트웨이를 통하여 클라우드로 전송한다. 클라우드에서는 이 정보를 모니터링하여 작물의 최적 조건을 유지하고, 이상 발생 알림, 에너지 및 자원 절약 등 다양한 이점을 취할 수 있다. 또한 BM 네트워크를 사용하면 저전력 네트워크 구현이 가능하기 때문에 네트워크의 수명을 늘리고 배터리 교체 등 유지보수를 빈번히 할 필요가 없다.

본 논문에서는 BM 네트워크에서 복잡한 중앙제어 없이 플러딩 메커니즘(flooding)을 사용하여 데이터를 전달하는 것을 가정한다. 하지만 플러딩 메커니즘은 노드의 수가 많아질수록 전송할 데이터 양이 증가하고, 또한 데이터 양이 많아질수록 단말기의 전력소모가 증가하고, 네트워크의 전송 성능이 저하될 수 있다. 따라서, BM 네트워크는 제한된 플러딩 메커니즘(managed flooding)을 채택하여 이러한 단점을 보완한다. 제한된

플러딩 프로토콜의 상세사항은 시스템 모델에서 상세 기술한다.

BM 네트워크의 성능을 향상하기 위해서 다양한 연구가 진행되었다. 데이터 전송 방법에 관한 연구로는 BLE의 광고 채널을 통해 데이터를 주기적으로 송신하는 비연결 지향 플러딩 기반 BM에 관한 연구, 주기적이고 시간에 민감하지 않은 데이터는 에너지 소비를 줄이기 위해 연결 지향 메커니즘으로 실행되며 산발적이고 긴급한 데이터를 전송하기 위해서는 플러딩 메커니즘으로 전환하는 Bluetooth Now에 관한 연구 등이 있다^{10,11)}. 또한, 전력소모, 전송속도, 지연시간, 처리량을 개선하기 위해서 노드에서 전송 확률이 높을수록 재전송 발생 횟수를 줄이는 방법에 대한 연구, 대규모 네트워크에 대한 트래픽 양, 에너지 소비 및 패킷 손실을 줄임으로써 BM 네트워크 자원의 효율적인 활용을 가능하게 하는 연구, BM의 처리량과 지연시간을 개선하는 연구 등이 있다¹²⁻¹⁴⁾.

BM 네트워크의 에너지 소모량을 분석한 연구에서 비동기 동적 스캐닝을 통하여 전력소모는 줄이는 결과를 보였다¹⁵⁾. 이때 전력 소모에 관한 모델링 수식은 다수의 변수로 구성되어 있기 때문에 각 변수가 전력 소모에 미치는 영향도를 파악하기 어려우며, 최적의 값을 찾기 위해서는 많은 계산량이 필요하다. 또한, 기존¹⁵⁾ 연구에서는 전력 소모 최적화에 대한 연구가 이루어지지 않았다. 본 논문은 다양한 변수의 영향을 고려하여 주요 파라미터를 선정하고 전력 소모 수식을 주요 네트워크 파라미터에 관한 수식으로 정리 후, 해당 파라미터가 전체 네트워크 전력소모에 미치는 영향도를 분석한다.

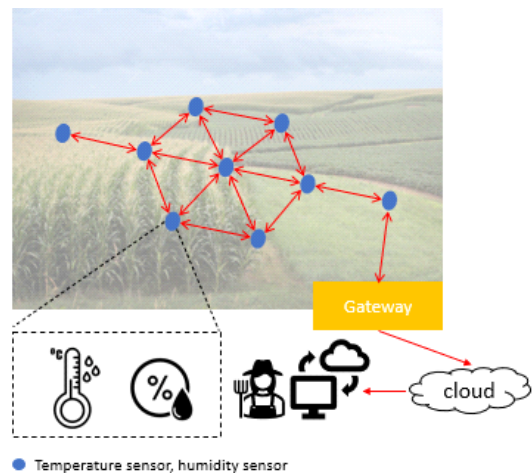


그림 1. 블루투스 메시를 통한 스마트 농장 가상 시나리오
Fig.1. Virtual smart farm scenario with BLE Mesh.

스캐닝 상태를 종료한다. 릴레이 노드(B)는 소스 노드에서 보낸 비동기 스캐닝 메시지 중 하나를 수신하면 일시적으로 연속 스캐닝 상태에 들어가는 동시에 새로운 비동기 스캐닝 메시지를 생성하고, 실제 데이터를 첫 번째 노드에게 전달 받고 세 번째 노드로 전송 후 연속 스캐닝 모드를 종료한다. 싱크 노드(C)가 릴레이 노드에서 보낸 비동기 스캐닝 메시지 중 하나를 수신하면, 연속 스캐닝 모드가 된다. 이러한 메커니즘을 통해 모든 노드가 싱크 노드로 데이터를 전송한다.

$scan Win^{seq}$ 은 최소한 한 개의 비동기 스캐닝 메시지를 받을 수 있을 만큼 스캐닝 시간을 설정해야 한다. $scan Win^{seq}$ 를 길게 설정한다면 노드에서 소모하는 전력이 증가하여 전체 에너지 관점에서 좋지 않다. 또한, $scan Win^{seq}$ 를 너무 짧게 설정한다면 스캐닝 시간 동안 비동기 스캐닝 메시지를 받지 못할 가능성이 높아지기 때문에 $scan Win^{seq}$ 를 네트워크의 에너지 절감과 메시지 수신 성공률의 트레이드 오프를 고려하여 설정할 필요가 있다. 기존 [15]의 시스템 모델에서 제안된 $scan Win^{seq}$ 수식을 이용하여 본 논문에 적용하였다.

$$scan Win^{seq} = pubInt^{seq} - netInt^{seq} \times N_{TC}^{seq} + 10 + N_{TC}^{seq} \times (netInt^{seq} + 10) + T_{AE}^{seq} \quad (3)$$

또한, $scan Win^{seq}$ 과 마찬가지로, $scanInt^{seq}$ 를 길게 설정한다면, $scan Win^{seq}$ 사이의 길이가 길어져 에너지 관점에서 이득으로 보일 수도 있지만, $scan Win^{seq}$ 의 길이도 동시에 늘어나게 되므로 결국 전체 에너지 관점에서 이점이 없다. 반대로 $scanInt^{seq}$ 를 짧게 설정한다면 $scan Win^{seq}$ 사이의 간격이 줄어들게 되어 자주 스캔을 하는 상태가 되기 때문에 노드에서의 전력소모가 증가하게 된다. 따라서, $scanInt^{seq}$ 도 $scan Win^{seq}$ 과 마찬가지로 네트워크의 에너지 절감과 메시지 수신 성공률의 트레이드 오프를 고려하여 설정할 필요가 있다. 기존 [15]의 시스템 모델에서 제안된 $scanInt^{seq}$ 수식을 이용하여 본 논문에 적용하였다.

$$scanInt^{seq} = (P_{RC}^{seq} + 1) \times pubInt^{seq} + 10 \quad (4)$$

T_{ADS} 는 일시적인 연속 스캐닝 상태의 지속시간이며, T_{ADS1} 과 T_{ADS2} 로 구성된다.

$$T_{ADS} = T_{ADS1} + T_{ADS2} \quad (5)$$

수식 (5)에서 T_{ADS1} 은 이벤트 발생 후 실제 데이터 전송 전까지의 시간이다. 목적지까지 홉(hop)의 개수에 따라 T^{seq} 의 시간이 증가하고, 릴레이 노드에서 처리되는 시간과 목적지에서 처리되는 시간이 추가된다.

$$T_{ADS1} = TTL_{ADS} \times T^{seq} + (TTL_{ADS} - 1) \times T_{PROC}^{relay} + T_{PROC}^{sink} \quad (6)$$

수식 (6)에서 T^{seq} 는 스캐닝에 관한 절차를 위하여 시퀀스 패킷을 여러 번 전송하는 시간이다. 수식 (7)은 그림 2에서 T^{seq} 의 길이이며, 발행 횟수, 네트워크 전송 횟수, 네트워크 전송 주기의 조합으로 발행 횟수, 네트워크 전송 횟수, 네트워크 전송 주기의 조합으로 첫 번째 항은 발행 횟수에 따른 네트워크 전송 횟수와 네트워크 전송 주기의 곱으로 발행 주기 만큼의 시간이며, 두 번째 항은 첫 번째 항 이후의 시간을 나타낸다. 이 길이는 네트워크 전송 횟수에 따른 네트워크 전송 주기와 광고 이벤트 지속 시간의 합이다.

$$T^{seq} = P_{RC}^{seq} \times [(N_{TC}^{seq} + 1) \times (netInt^{seq} + 10)] + N_{TC}^{seq} \times (netInt^{seq} + 10) + T_{AE}^{seq} \quad (7)$$

수식 (5)에서 T_{ADS2} 는 실제 데이터를 보내기 위하여 필요한 시간이다. T_{ADS2} 는 현재 노드에서 광고 이벤트 지속 시간, 릴레이 후 홉의 수에 따른 네트워크 전송 주기와 광고 이벤트 지속시간의 합, 릴레이 후 홉의 수에 따른 릴레이 노드에서의 처리 지연 시간, 목적지 노드에서의 처리 지연시간의 합이다. 주로 홉의 개수에 따른 릴레이 시간을 고려한다.

$$T_{ADS2} = T_{AE}^{data} + (TTL_{ADS} - 1) \times (netInt^{seq} + T_{AE}^{data}) + (TTL_{ADS} - 1) \times T_{PROC}^{relay} + T_{PROC}^{sink} \quad (8)$$

수식에서 쓰인 변수들을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 파라미터들의 정의.
Table 1. Definitions of network parameters.

Param.	Definition
$netInt^{seq}$	Network interval when sending sequence(ms)
N_{TC}^{seq}	Repeat count per one publication
$pubInt^{seq}$	Publish interval when sending sequence(ms)
P_{RC}^{seq}	Publish repeat count when sending sequence

Param.	Definition
TTL_{ADS}	Number of hops
N_{TX}	Number of transmissions in a day
I_{TX}	Current when transmitting(mA)
I_{scan}	Current when scanning(mA)
I_{idle}	Current in idle(mA)
V	Voltage(V)
T_{PROC}^{relay}	Relay node's processing time(ms)
T_{PROC}^{sink}	Destination's processing time(ms)
T_{AE}^{seq}	Time of adv event sequence time(ms)
T_{AE}^{data}	Time of adv event data time(ms)
N_{data}	Number of data to send
T_{day}	Time of a day(ms)

하나의 N_{TX} 당 N_{data} 개의 데이터를 한번 보내며 그 때마다 시퀀스 절차가 활성화되면서 발행(publish)을 하게 되는데 그때 $pubInt^{seq}$ 간격으로 $P_{RC}^{seq} + 1$ 개만큼 $netInt^{seq}$ 간격으로 $N_{TC}^{seq} + 1$ 개 반복전송을 하게 된다.

III. 스마트 농장 무선 네트워크 소모에너지의 수학적 분석

소비전력(E_{ADS})을 최적화하기 위하여 $pubInt^{seq}$, P_{RC}^{seq} , N_{TX} , TTL_{ADS} 변수를 고려한다. 각각 데이터 발행 간격, 데이터 발행 빈도 수, 하루동안 보낸 데이터의 개수 네트워크의 크기를 나타낸다. 위 4가지 변수를 이용하여 소비전력을 최적화한다.

총 소모에너지(E_{ADS})는 다음식과 같이 4가지 전력 소모 식으로 분리할 수 있다.

$$E_{ADS} = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 \quad (9)$$

E_0 는 스캐닝 상태 중 전송할 데이터가 있을 때 스캔 에너지 소비량이며, 데이터 송신 활성화 시간에서 시퀀스 패킷을 전송하는 시간, 실제 데이터를 전송하는 시간을 제외한 오직 스캐닝 상태의 시간만 고려하여 에너지를 계산하였다.

$$E_0 = V[I_{scan} \times T_{ADS} - [(P_{RC}^{seq} + 1) \times (N_{TC}^{seq} + 1) \times T_{AE}^{seq} + N_{data} \times T_{AE}^{data}] \times N_{TX} \quad (10)$$

E_1 는 스캐닝 절차 시작을 위한 시퀀스 패킷을 여러 번 전송할 때와 실제 데이터를 전송할 때 에너지 소비량이다. 위

(10)에서 제외했던 시간에서 시퀀스 패킷을 전송하는 시간, 실제 데이터를 전송하는 시간만 고려하여 에너지를 계산하였다.

$$E_1 = V[I_{TX} \times [(P_{RC}^{seq} + 1) \times (N_{TC}^{seq} + 1) \times T_{AE}^{seq} + N_{data} \times T_{AE}^{data}] \times N_{TX} \quad (11)$$

E_2 는 데이터를 보내지 않을 때 스캔에너지 소비량이다. 하루 동안의 시간에서 데이터를 전송하는 시간을 제외한 후, 주기적으로 스캐닝 상태로 전환될 때의 시간을 고려하여 에너지를 계산하였다.

$$E_2 = V[I_{scan} \times [T_{day} - T_{ADS} \times N_{TX}] \times \frac{scanWin^{seq}}{scanInt^{seq}}] \quad (12)$$

E_3 는 idle상태일때 에너지 소비량이다. 하루 동안의 시간 중 데이터 전송 시간을 제외한 후, idle 상태에서는 스캐닝을 하지 않으므로 스캐닝 상태 시간 비율을 1에서 제외하여 에너지를 계산하였다.

$$E_3 = V[I_{idle} \times [T_{day} - T_{ADS} \times N_{TX}] \times (1 - \frac{scanWin^{seq}}{scanInt^{seq}})] \quad (13)$$

실제 사용 환경을 고려하여 표 2와 같이 파라미터 값을 설정하였다.

본 논문은 BM 네트워크의 주요 파라미터인 특정 N_{TX} , TTL_{ADS} 이 최적 $pubInt^{seq}$, P_{RC}^{seq} 값에 미치는 영향을 분석한다. 이를 위해 소비전력 식을 N_{TX} , TTL_{ADS} , $pubInt^{seq}$, P_{RC}^{seq} 에 대한 식으로 정리하고, 정

표 2. 파라미터 값.
Table 2. Parameter values.

Param.	Value	Param.	Value
I_{TX}	16.4mA	V	3V
I_{scan}	4.6mA	N_{data}	1 packet
I_{idle}	0.01mA	T_{day}	A day in ms
T_{AE}^{seq} , T_{AE}^{data}	1.694ms		
T_{PROC}^{relay} , T_{PROC}^{sink}	20µs	N_{TC}^{seq}	4

리한 수식을 기반으로 하여, 다양한 시나리오에서 영향도를 분석한다. 또한, 특정 N_{TX} , TTL_{ADS} 에 관하여 분석한 결과를 삼차원 그래프로 시각화 하여 $pubInt^{seq}$, P_{RC}^{seq} 의 영향을 분석한다. 이를 통해 각 변수가 최적값에 미치는 영향도를 분석한다. 더불어, 특정 N_{TX} , TTL_{ADS} 에 관하여, $pubInt^{seq}$ 또는 P_{RC}^{seq} 를 유효값으로 설정하고 각 변수의 패턴을 분석하기 위해 이차원 그래프를 사용한다. 이를 통해 각 변수의 에너지 소모에 대한 특성을 더욱 자세히 분석한다.

E_{ADS} 를 최적화 하기 위해서 $netInt^{seq}$, N_{TC}^{seq} 의 영향도를 분석한다. 각각 데이터 반복 전송 간격, 네트워크의 신뢰성을 위한 데이터 반복 전송 빈도 수를 의미한다. $netInt^{seq}$ 를 본 논문의 시나리오를 기반으로 $pubInt^{seq}$ 에 관해 (14) 같이 치환을 하면 N_{TC}^{seq} 가 연속으로 발생한 후 다음 발행에 대한 N_{TC}^{seq} 를 기다리는 시간을 유의미한 데이터 전송시간으로 채움으로써 낭비하는 시간을 없애고 동시에 E_{ADS} 에서 다른 변수가 줄어들게 된다.

$$netInt^{seq} = \frac{pubInt^{seq}}{N_{TC}^{seq} + 1} - 10 \quad (14)$$

또한 N_{TC}^{seq} 는 값이 높아질수록 네트워크의 신뢰성이 높아지지만 배포하는 데이터의 값이 많아지므로 스케닝 시간이 들어가 전력 소모(E_{ADS})값이 증가하게 되며, N_{TC}^{seq} 값을 낮게 설정한다면 전력 소모(E_{ADS})값이 낮아지는 대신 네트워크의 신뢰성이 낮아지는 트레이드 오프 관계가 있다. 따라서, 네트워크의 에너지 절감과 네

트워크 신뢰성의 트레이드 오프를 고려하여 N_{TC}^{seq} 값을 설정하였다.

수식을 정리한 결과, 최종적으로 E_{ADS} 는 N_{TX} , TTL_{ADS} , $pubInt^{seq}$, P_{RC}^{seq} 에 관한 식으로 정리할 수 있다.

$$E_{ADS} = (c_1 \times pubInt^{seq} - c_2 \times N_{TX} + c_3 \times N_{TX} \times TTL_{ADS} + c_4 \times N_{TX} \times pubInt^{seq} + c_5 \times P_{RC}^{seq} \times pubInt^{seq} + c_6 \times N_{TX} \times P_{RC}^{seq} + c_7 \times N_{TX} \times P_{RC}^{seq} \times pubInt^{seq} - c_8 \times N_{TX} \times TTL_{ADS} \times pubInt^{seq} - c_9 \times N_{TX} \times P_{RC}^{seq} \times (pubInt^{seq})^2 + c_{10} \times N_{TX} \times (P_{RC}^{seq})^2 \times pubInt^{seq} + c_{11} \times N_{TX} \times P_{RC}^{seq} \times TTL_{ADS} \times (pubInt^{seq})^2 + c_{11} \times N_{TX} \times (P_{RC}^{seq})^2 \times TTL_{ADS} \times (pubInt^{seq})^2 - c_{12} \times N_{TX} \times P_{RC}^{seq} \times TTL_{ADS} \times pubInt^{seq} + c_{13}) / (c_{14} \times pubInt^{seq} + c_{14} \times P_{RC}^{seq} \times pubInt^{seq} + c_{15}) \quad (15)$$

위 수식에서 유효 N_{TX} , TTL_{ADS} 값을 대입한 후 그래프로 나타내면 쌍곡포물면이 나오며 특정 N_{TX} , TTL_{ADS} 에 대한 최적 $pubInt^{seq}$, P_{RC}^{seq} 의 경향성을 파악할 수 있다.

IV. 모의 실험 및 논의

최종 전력 소모 수식 (15)를 바탕으로 하여 특정 N_{TX} , TTL_{ADS} 에 대한 E_{ADS} , $pubInt^{seq}$, P_{RC}^{seq} 의 경향성을 파악할 것이다.

그림 3은 $N_{TX} = 960$, $TTL_{ADS} = 32$ 를 대입해 $pubInt^{seq}$ 와 P_{RC}^{seq} 값으로 인한 전력 소모량을 시각화 한 것으로 BM 네트워크의 소모에너지가 최소화 되는 지점을 흰색 동그란 점으로 표시하였다. N_{TX} , TTL_{ADS} 값이 클수록 P_{RC}^{seq} 의 값은 최소 유효값인 0에 가까운 값이 최적값이 되고 N_{TX} , TTL_{ADS} 값이 작을수록 P_{RC}^{seq} 의 최적값이 최대 유효값인 7로 수렴한다. 한편, $pubInt^{seq}$ 의 경우 N_{TX} , TTL_{ADS} , P_{RC}^{seq} 값이 전부 높을 때 최적값은 최소 유효값인 150으로 수렴하고 전부 낮을 때는 최대 유효값인 1600으로 수렴하는 경향이 있다.

그림 4는 N_{TX} 가 약 1200이하, TTL_{ADS} 가 43이하 일때의 경우를 증첩해 그린 것으로 발행주기에 따른 전력소모량을 나타낸다. 대부분 발행주기가 150ms일 때

표 3. (15)결과식의 상수들.
Table 3. Constants in result (15).

Cons.	Value	Cons.	Value
c_1	1.4904e16	c_9	3.4425e7
c_2	2.679e10	c_{10}	3.748e9
c_3	4.71645e10	c_{11}	1.721e8
c_4	5.9329e9	c_{12}	8.3078e9
c_5	3.24e13	c_{13}	7.690964904e17
c_6	3.74798e10	c_{14}	1.25e7
c_7	9.967e9	c_{15}	1.25e8
c_8	7.1766e9		

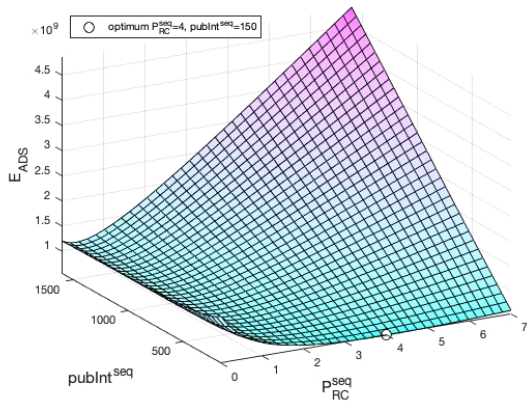


그림 3. 전력 소모량의 3D그래프와 최적 지점
Fig. 3. A 3D graph of power consumption and optimal point.

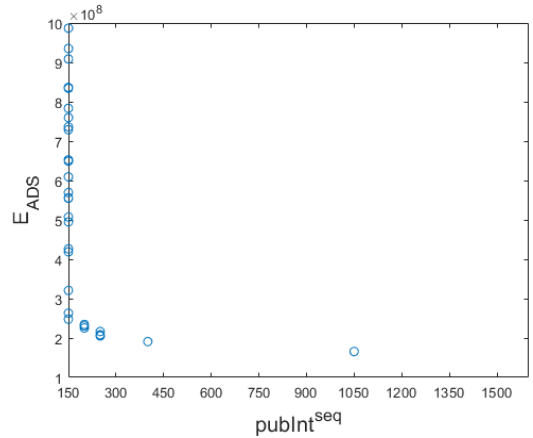


그림 5. 최적 발행주기 값의 산포도
Fig. 5. Dispersion of optimal $pubInt^{seq}$ points.

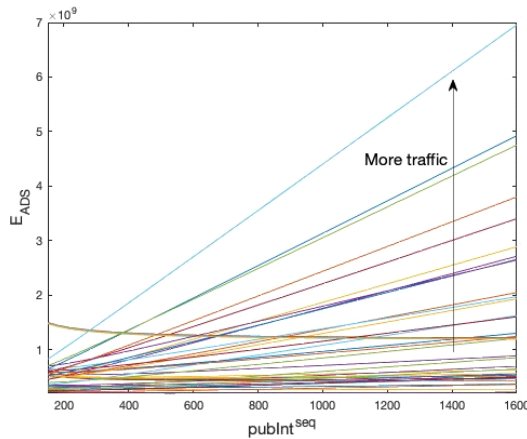


그림 4. 발행주기에 따른 전력소모량
Fig. 4. E_{ADS} by $pubInt^{seq}$.

전력 소모량이 최소가 된다는 것을 위 범위 내 상황에 따른 최적 발행주기 값의 점들인 그림 5를 통해 알 수 있다. 예외적으로, 트래픽이 굉장히 적은 경우와 발행의 개수가 1이 되는 경우($P_{RC}^{seq}=0$)에서는 150에서 1600으로 감소한다. 또한, 유효범위 내 컨벡스 형태를 띠는 경우, 해당 지점에서의 전력 소모량과 발행주기를 150으로 대입했을 때의 전력 소모량이 큰 차이가 없음이 그림 4를 통해 나타난다.

그림 6은 그림 4를 그릴 때와 동일 범위에서 발행개수에 따른 전력소모량을 나타낸다. 트래픽이 적은 경우 발행개수를 8로 맞추는 것($P_{RC}^{seq}=7$)이 전력 소모를 최소화하며, 트래픽이 많아질수록 전력 소모 그래프의 경사각이 음수에서 양수로 전환되면서 급격하게 증가한다.

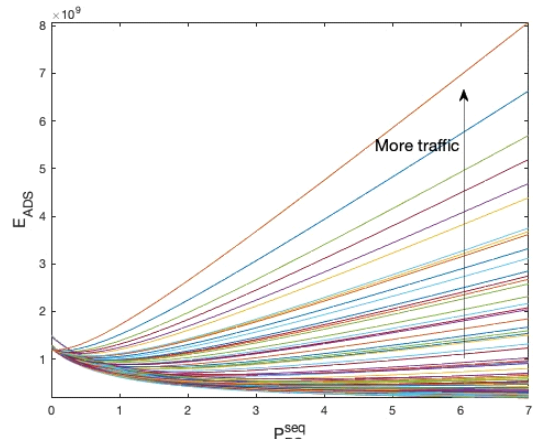


그림 6. 발행개수에 따른 전력소모량
Fig. 6. E_{ADS} by P_{RC}^{seq} .

이로 인해 최소 소모 전력점이 0에 가까워진다.

표 4는 다양한 시나리오에서의 전력 소모를 보여준

표 4. 무선 네트워크의 노드별 기대수명 (4000mAh, 3V 배터리 기준).
Table 4. Exprected lifetiemp of networks (with 4000mAh, 3V battery).

Scn.	N_{TX}	TTL_{ADS}	P_{RC}^{seq}	$pubInt^{seq}$	mWh	Days
1	24	23	7	400	2.209	226
2	24	43	7	250	2.376	210
3	24	63	7	250	2.505	199
4	1440	23	4	150	6.589	75
5	1440	43	3	150	8.520	58
6	1440	63	2	150	9.681	51

다. N_{TX} 가 증가함에 따라 전력 소모는 증가하며, TTL_{ADS} 가 증가함에 따라 전력 소모가 증가한다. 4000mAh, 3V의 전원을 가진 노드에서 N_{TX} 가 24, TTL_{ADS} 가 23으로 낮은 값을 가질 경우 노드의 생존 시간을 226일까지 연장 할 수 있으며, N_{TX} 가 1440, TTL_{ADS} 가 63인 경우에도 노드의 생존 시간은 51일까지 연장 할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 비동기 동적 스캔 시스템에서의 블루투스 메시 네트워크의 에너지 소모를 수학적으로 모델링 하여 핵심 파라미터들이 미치는 영향을 분석하였다. 네트워크 크기가 커지거나 전송 빈도수가 올라감에 따라 발행개수가 적을수록 최적에 가깝게 되고 발행주기 변수는 재발행을 하지 않을 때 값이 클수록 에너지 소모를 적게 하고 네트워크 노드 수, 전송 빈도수, 발행개수가 많아지면서 점점 유효 최소값이 최적값이 되는 경향을 보인다.

BM 네트워크는 데이터 수신을 위해 항상 스캐닝 상태를 유지해야 하기 때문에 전력 소모가 크다. 하지만 비동기 동적 스캔 기반 BM 네트워크를 이용한다면 데이터를 주고 받을 때만 스캐닝 상태로 전환되므로 BM 네트워크에 비해 전력 소모량을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 비동기 동적 스캐닝 BM 네트워크의 전력 소모 수식을 기반으로 N_{TX} , TTL_{ADS} 의 곱의 값과 노드의 생존 시간의 트레이드 오프 관계를 보여준다. 일례로, N_{TX} 가 24, TTL_{ADS} 는 23으로 동시에 낮은 값을 가질 때 전력 소모를 큰 폭으로 줄여 노드의 생존 시간을 226일까지 연장 할 수 있으며, N_{TX} 가 1440, TTL_{ADS} 는 63으로 동시에 높은 값을 가질 때에도 전력 소모를 줄여 노드의 생존 시간을 51일까지 연장 할 수 있다. 다양한 네트워크 시나리오에서 노드의 생존 시간을 늘릴 수 있음을 보였으며 스마트 농장 구현 시나리오에 폭 넓게 적용할 수 있다. 예를 들어 온도 센서, 습도 센서에서 수집한 정보를 게이트웨이를 통하여 클라우드로 전송한다. 클라우드에서는 이 정보를 모니터링하여 작물의 최적 조건을 유지하고, 이상 발생 알림, 에너지 및 자원 절약 등 다양한 이점을 취할 수 있다. 또한 BM 네트워크를 사용한다면 네트워크의 크기가 크고 전송량이 많은 경우에도 저전력 네트워크 구현이 가능하기 때문에 네트워크의 수명을 51일까지 늘릴 수 있다. 따라서, 배터리 교체 등 유지보수를 빈번히 할 필요 없

기 때문에 작물의 생산량 증가와 유지보수에 필요한 비용 감소로 이어질 수 있다.

향후 연구에서는 본 연구를 확장하여 다양한 최적화 알고리즘을 적용하고 에너지 소모를 최소로 하는 최적 파라미터 세트를 구하는 방법을 연구할 예정이다.

References

- [1] A. Hernández-Solana, D. Pérez-Díaz-De-Cerio, M. García-Lozano, A. V. Bardají, and J.-L. Valenzuela, "Bluetooth mesh analysis, issues, and challenges," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 53784-53800, 2020. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980795>) (<https://ieeexplore.ieee.org/document/9035389>)
- [2] Y. Kim, K. Jung, and J. Kim, "Research trends in internet of things communication technology in smart farming environments," *J. KICS*, vol. 38, no. 8, pp. 11-18, 2021. (<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10586673>)
- [3] F. K. Shaikh, S. Karim, S. Zeadally, and J. Nebhen, "Recent trends in internet-of-things-enabled sensor technologies for smart agriculture," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 9, no. 23, pp. 23583-23598, Dec. 2022. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3210154>) (<https://ieeexplore-ieee-org-ssl.libproxy.seoultech.ac.kr/document/9903855>)
- [4] W. Xu, et al., "The design, implementation, and deployment of a smart lighting system for smart buildings," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 6, no. 4, pp. 7266-7281, Aug. 2019. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2915952>) (<https://ieeexplore-ieee-org-ssl.libproxy.seoultech.ac.kr/document/8710297>)
- [5] W. Yu, Y. Liu, T. Dillon, W. Rahayu, and F. Mostafa, "An integrated framework for health state monitoring in a smart factory employing IoT and big data techniques," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 9, no. 3, pp. 2443-2454, Feb. 2022. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3096637>)

- (<https://ieeexplore-ieee-org-ssl.libproxy.seoultech.ac.kr/document/9481251>)
- [6] S. Kolozali, et al., "Observing the pulse of a city: A smart city framework for real-time discovery, federation, and aggregation of data streams," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 2651-2668, Apr. 2019.
(<https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2872606>)
(<https://ieeexplore-ieee-org-ssl.libproxy.seoultech.ac.kr/document/8476168>)
- [7] Bluetooth SIG. *Mesh Profile Bluetooth Specification V1.0.1*, Bluetooth SIG, Kirkland, WA, USA, 2019. (<https://www.bluetooth.com/specifications/specs/mesh-profile-1-0-1/>)
- [8] Bluetooth SIG. *Bluetooth Core Specification 5.1*. Accessed: Oct. 17, 2019. [Online] (<https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-1/>)
- [9] R. Rondón, A. Mahmood, S. Grimaldi, and M. Gidlund, "Understanding the performance of bluetooth mesh: Reliability, delay, and scalability analysis," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 7, no. 3, pp. 2089-2101, Mar. 2020.
(<https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2960248>)
(<https://ieeexplore.ieee.org/document/8935348>)
- [10] J. Park and C. Kim, "Survey on BLE-based mesh networks," in *Proc. KISS Conf.*, pp. 516-518, Busan, Korea, Dec. 2017.
(<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07322208>)
- [11] Y. Murillo, B. Reynders, A. Chiumento, S. Malik, P. Crombez, and S. Pollin, "Bluetooth now or low energy: Should BLE mesh become a flooding or connection oriented network?," *2017 IEEE 28th Annu. Int. Symp. PIMRC*, pp. 1-6, Montreal, QC, Canada, Oct. 2017.
(<https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292705>)
(<https://ieeexplore.ieee.org/document/8292705>)
- [12] W. Cao, et al., "An energy effective opportunistic routing mechanism for ble mesh," *2021 13th Int. Conf. WCSP*, pp. 1-6, Changsha, China, Oct. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/WCSP52459.2021.9613658>)
- (<https://ieeexplore.ieee.org/document/9613658>)
- [13] A. Hussein, R. Tarek, H. Osama, R. Fawzy, K. Elsayed, and M. Taha, "An AODV-Based routing scheme for large-scale bluetooth low-energy mesh networks," *2020 8th Int. JAC-ECC*, pp. 7-10, Alexandria, Egypt, Dec. 2020.
(<https://doi.org/10.1109/JAC-ECC51597.2020.9355932>)
(<https://ieeexplore.ieee.org/document/9355932>)
- [14] D. Perez-Diaz-De-Cerio, A. Hernandez-Solana, M. Garcia-Lozano, A. V. Bardaji, and J. -L. Valenzuela, "Speeding up bluetooth mesh," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 93267-93284, 2021.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093102>)
(<https://ieeexplore.ieee.org/document/9466503>)
- [15] D. Perez-Diaz-de-Cerio, J. L. Valenzuela, M. Garcia-Lozano, Á. Hernández-Solana, and A. Valdovinos, "BMADS: BLE mesh asynchronous dynamic scanning," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 8, no. 4, pp. 2558-2573, Feb. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3018022>)
(<https://ieeexplore.ieee.org/document/9171360>)

김 우 현 (Woo Hyun Kim)



2022년 2월 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 학사 졸업
2022년 3월~현재 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학 석사과정 재학
<관심분야> 무선통신 시스템, IoT, 5G

최 승 규 (Seung-Kyu Choi)



2021년 2월 : 신한대학교 컴퓨터
공학과 학사 졸업
2021년 3월~현재 : 서울과학기술
대학교 컴퓨터공학 석박사
통합과정 재학
<관심분야> 임베디드, 무선통신
시스템, IoT

손 일 수 (Illsoo Sohn)



2003년 2월 : 서울대학교 전기
공학사
2005년 2월 : 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 공학석사
2009년 8월 : 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 공학박사
2009년 9월~2010년 9월 :
The University of Texas at Austin postdoc
연구원
2010년 11월~2012년 7월 : LG전자 선임연구원
2012년 8월~2013년 8월 : KT 매니저
2013년 9월~2017년 2월 : 가천대학교 전자공학과
조교수
2017년 2월~현재 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학
과 부교수
<관심분야> 무선통신 시스템, 분산네트워크 최적화