

다중 WPAN 프로토콜 IoT 네트워크의 통합 구현과 성능 분석

박 성 현*, 주 재 한*, 김 석 찬°

Integration and Performance Analysis of a Multi-WPAN Protocol IoT Network Implementation

Seonghyeon Park*, Jaehan Joo*, Suk Chan Kim°

요 약

사물인터넷 네트워크에서 기기 간의 원활한 상호운용성을 위해 다중 통신 프로토콜들의 통합이 중요해지고 있다. 이를 따라 최근 Thread, Zigbee, Bluetooth Low Energy(BLE)를 결합한 네트워크 구성을 통해 각 프로토콜의 장점을 최대로 활용하고자 하는 시도가 증가하고 있다. 그러나 이 과정에서 기기 설치 및 운영의 복잡성이 증가할 수 있으며, 이에 따른 비용 부담이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 비용 효율성 증대 및 통합 네트워크 구현 시 발생할 수 있는 문제들을 해결하기 위한 다중 Wireless Personal Area Network(WPAN) 프로토콜 간의 효율적인 통신 방안을 제안한다.

키워드 : 다중 프로토콜, 사물인터넷, 쓰레드, 직비, 블루투스 로우 에너지

Key Words : Multiprotocol, Internet of Things, Thread, Zigbee, Bluetooth Low Energy

ABSTRACT

The integration of multiple communication protocols is becoming increasingly important to ensure seamless interoperability between devices in IoT networks. Recently, there has been a growing trend of combining Thread, Zigbee, and Bluetooth Low Energy network (BLE) to maximize the strengths of each protocol. However, this process can increase the complexity of device installation and operation, leading to additional cost burdens. Therefore, this paper proposes efficient communication strategies among multiple Wireless Personal Area Network(WPAN) protocols to enhance cost efficiency and address potential issues that may arise during the implementation of integrated networks.

I. 서 론

현재 인터넷에 연결되는 객체의 수가 전례 없는 속도로 증가하면서 사물인터넷의 개념이 실현되고 있다. 이

러한 객체의 대표적인 예로는 다양한 센서를 기반으로 스마트 홈 환경을 구현하는 HVAC(Heating, Ventilation, and Air Conditioning) 모니터링 및 제어 시스템이 있다.^[1] 스마트 홈 Internet of Things(IoT) 생

※ 이 과정은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

♦ First Author : Pusan National University Department of Electronics Engineering, shpark24@pusan.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Pusan National University Department of Electronics Engineering, sckim@pusan.ac.kr, 종신회원

* Pusan National University Department of Electronics Engineering, jhjoo2018@pusan.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202412-323-D-RN, Received December 19, 2024; Revised December 20, 2024; Accepted December 20, 2024

태계 구축에 있어서 주로 IEEE 802.15의 Wireless Personal Area Network(WPAN), 802.11의 Wireless Local Area Network(WLAN) 계열의 통신 프로토콜들이 사용된다. WPAN 계열에서는 주로 Thread, Zigbee, Bluetooth Low Energy(BLE)가 많이 사용되며 저전력, 저비용, 높은 확장성의 장점이 있다. 하지만 짧은 통신 거리, 낮은 데이터 전송 속도, 상호운용성 문제 등의 단점이 존재한다. 특히 Zigbee Direct는 견고한 메시 네트워크를 제공하여 스마트 홈 IoT 환경에서 널리 사용되고 있으며, Zigbee와 BLE 기기 간의 직접 통신을 가능하게 하여 상호운용성을 향상시킨다. BLE는 기기 간의 초기 설정 및 상태 모니터링에 주로 활용되며, 높은 에너지 효율성과 짧은 대기 시간을 제공하여 스마트 홈 기기에 적합하다. 스마트 조명, 스마트 잠금장치, 무선 센서 네트워크와 같은 제품들이 시장에서 많이 사용되는 WPAN 계열 제품이다.

위와 같은 다양한 통신 프로토콜을 기반으로 스마트 홈 IoT 생태계를 구성하는 데 있어 제품 제작자와 소비자 공통의 여러 문제점 중 하나는 제품 간의 통신 프로토콜 상호운용 문제이다. 소비자는 새로운 기능 및 사양의 제품들을 자신의 홈 IoT 생태계에 등록하여 사용하고 싶지만, 기존에 구성한 생태계와 호환되지 않아 사용할 수 없는 문제가 발생한다. 이는 홈 IoT 시장에서 해결하지 못하면 장기적으로 악화될 수 있는 사안으로 이를 해결하기 위해 최근 Matter라는 프로토콜이 제안되었다.^[2]

Matter는 다양한 스마트 홈 장치 간의 상호 호환성을 높이기 위해 개발된 오픈 소스 프로토콜이며, 2019년에 애플, 구글, 아마존 등 여러 주요 기술 회사들이 참여하는 Connectivity Standards Alliance(CSA)에 의해 처음 발표되었다.^[3] Matter의 스택 구조는 WLAN의 Wi-Fi, Local Area Network(LAN)의 Ethernet, WPAN의 Thread, Zigbee Direct, BLE와 같은 다양한 네트워크 레이어로 구성되어 있으며, 이를 통해 다양한 기기들이 서로 원활하게 통신할 수 있도록 지원한다. Matter의 목표는 사용자 경험을 개선하고, 장치 간의 통합을 촉진하는 것이다.

Matter의 주요 WPAN으로 사용될 Thread는 저전력, 저속 통신을 제공하여 배터리 수명이 중요한 기기들에 적합하며, Internet Protocol version 6(IPv6)을 지원하여 기존 IP 네트워크와의 통합이 용이하다. 또한, 메시 네트워킹을 통해 높은 신뢰성과 확장성을 제공하며, 보더 라우터를 통해 다른 네트워크와의 원활한 연결을 지원한다.

본 논문에서는 기존 WPAN 기반 스마트 홈 IoT 생

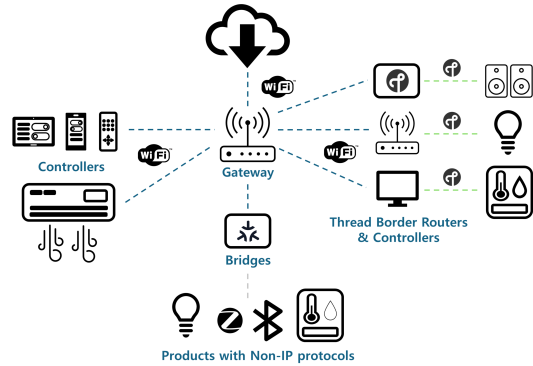


그림 1. 다중 프로토콜 매터 생태계
Fig. 1. Multiprotocol Matter ecosystem

태계의 상호운용성 문제를 해결하기 위해 Thread와 Co-Processor Communication Daemon(CPCd) 알고리즘을 기반으로 다중 WPAN 프로토콜 IoT 네트워크의 통합 방법을 제안하고 이를 실제로 구현하여 그 가능성을 확인한다. 이후 내용은 다음과 같이 구성된다. 먼저 II에서 Thread, Zigbee Direct, BLE 네트워크의 구조와 기능을 상세히 분석하여 각기 다른 통신 프로토콜과의 상호운용성을 설명한다. 그리고 다중 프로토콜의 통합을 위해 사용할 CPCd와 Radio Co-Processor(RCP)에 관한 설명과 제안하는 통합 방법 및 실험에서 수행할 역할에 대하여 설명한다. 다음으로 III에서 시스템 구현 및 실험을 통해 다양한 시나리오에서 Thread, Zigbee Direct, BLE 네트워크의 성능을 평가하고, 최적의 네트워크 구성을 도출하고 IV에서 결론을 맺는다.

II. 본 론

2.1 관련 기술

본 목차에서는 통합 네트워크 시스템을 구성할 WPAN 계열의 Thread, Zigbee, BLE에 대해 간략하게 설명하고, 네트워크 통합을 위해 사용되는 CPCd와 RCP에 대하여 설명한다.

OSI 7 Layer	BLE	Zigbee Direct	Zigbee	Thread
Application	GATT	Application Framework	Application Framework	ZDO Management Plane
Presentation	ATT			Security / Commissioning
Session		Application Support Sublayer (APS)	Application Support Sublayer (APS)	
Transport	SMP		Security Service Provider	
Network	GAP	Network (NWK) layer	Network(NWK) layer	
Data Link	L2CAP	GATT, ATT, SMP		
Physical	LE PHY	LE PHY		

그림 2. OSI 7계층 종합표
Fig. 2. OSI 7-Layer Model Comprehensive Table

2.1.1 Thread

Thread는 Matter가 채택한 주요한 저속, 저전력 프로토콜로 스마트 홈 환경에서 배터리 수명이 중요한 기기에 적합하다. Thread를 채택한 이유는 먼저 다른 프로토콜의 허브와 같은 역할을 하는 보더 라우터를 통해 IPv6와 같은 IP 라우팅이 가능하기 때문이다. 보더 라우터는 네트워크 내에서 중요한 역할을 담당하며, 하나의 보더 라우터가 네트워크에서 제외되었을 때 다른 보더 라우터가 자동으로 그 역할을 이어받아 네트워크의 안정성을 유지한다. 따라서 보더 라우터를 여러 개 배치하여 네트워크의 신뢰성을 높일 수 있다.

Thread 네트워크에서는 보더 라우터가 Thread 기기가 아닌 디바이스와 IPv6 기반 통신을 하기 위해 Off Mesh Routable(OMR) 주소를 사용한다. 이는 OMR 접두어(prefix)로 시작하는 IPv6 주소 형태로, WiFi/Ethernet 네트워크 또는 다른 메시의 Thread 네트워크와 연결을 가능하게 한다. 이러한 기능 덕분에 Thread는 기존 IP 네트워크와의 통합이 용이하며, 스마트 홈 기기들이 효율적으로 통신할 수 있도록 지원한다.

Thread는 메시 네트워킹을 통해 높은 신뢰성과 확장성을 제공한다. 메시 네트워킹은 네트워크 내의 모든 기기가 서로 연결되어 데이터를 전달할 수 있게 하며, 특정 기기가 작동하지 않더라도 데이터가 다른 경로를 통해 전달될 수 있도록 한다. 이는 네트워크의 내구성을 크게 높인다.

또한, Thread는 다른 프로토콜과의 상호운용성을 강화하기 위해 설계되었다. 이는 Thread가 BLE, Zigbee와 같은 다른 프로토콜과 함께 사용될 때 특히 유용하다. 예를 들어, BLE는 기기의 초기 설정 및 상태 모니터링에 사용될 수 있으며, Thread는 지속적인 데이터 통신을 담당할 수 있다. 이를 통해 네트워크의 효율성을 높이고, 다양한 IoT 기기들이 하나의 통합된 네트워크에서 원활하게 작동할 수 있게 한다.

Thread의 이러한 특징들은 스마트 홈뿐만 아니라 산업용 IoT, 스마트 빌딩, 스마트 시티 등 다양한 분야에서 활용될 수 있다. 특히, 확장성이 뛰어나고 다양한 기기 간의 원활한 통신을 보장하는 Thread는 미래의 IoT 네트워크 구성에 있어 중요한 역할을 할 것이다.

2.1.2 Zigbee (Zigbee Direct)

Zigbee Direct는 Zigbee와 BLE를 연결하여 이들 프로토콜을 사용하는 기기 간의 원활한 통신을 가능하게 하는 혁신적인 솔루션이다. Zigbee Direct는 BLE 기기에서 Zigbee 기기와 네트워크에 암호화되고 인증된 접근을 가능하게 하며, 이를 통해 스마트 기기와 허브가

Zigbee 네트워크에서 기기를 구성하고 제어할 수 있도록 한다. 이 네트워크에는 고유한 기능과 역할을 수행하는 두 가지 유형의 기기가 포함된다.

- **Zigbee Direct Device(ZDD):** Zigbee와 BLE 스택을 동시에 실행할 수 있는 엔드 디바이스, 라우터, 코디네이터, 트러스트 센터를 포함한 Zigbee 기기이다. 또한, BLE 기기와 Zigbee 네트워크 간의 데이터 교환을 지원한다.
- **Zigbee Virtual Device(ZVD):** BLE 기반의 기기로, Zigbee 네트워크 내에서 Zigbee 기기처럼 작동하거나 ZDD를 통해 트러스트 센터나 구성 도구 등의 특정 역할을 수행할 수 있다.

아래는 Zigbee Direct의 주요한 두 서비스이다.

- **Zigbee Direct Commissioning Service:** ZVD가 ZDD를 통해 네트워크의 구성 및 관리를 수행할 수 있도록 하는 여러 특성을 포함한 필수 BLE Generic Attribute Profile (GATT) 서비스이다.
- **Zigbee Direct Tunnel Service:** ZDD가 Zigbee 네트워크와 데이터 교환을 수행할 수 있도록 하는 선택적 BLE GATT 서비스이다. ZVD와 ZDD 간의 신뢰할 수 있는 링크를 제공하며, ZDD가 네트워크 내에서 엔드 디바이스로 작동할 때는 사용할 수 없다.^[4]

2.1.3 Bluetooth Low Energy

BLE는 Bluetooth 4.0에서 처음 도입된 저전력, 저속 통신 프로토콜이다. 주로 IoT 네트워크에 적합한 통신 기술로, BLE는 높은 에너지 효율성과 짧은 대기 시간을 제공하여, 배터리 수명이 중요한 스마트 홈 기기들에 적합하다. 또한, 다양한 소비자 기기들과의 호환성을 제공한다.

BLE는 기존 블루투스 기술과 달리 낮은 데이터 전송률을 제공하면서도 매우 낮은 전력 소모를 유지한다. 이러한 특징 덕분에 피트니스 트래커, 스마트 워치, 의료 기기 등 다양한 IoT 기기들에 널리 사용된다. 또한 다양한 소비자 기기와의 호환성을 제공하여, 스마트폰, 태블릿PC, 컴퓨터 등과 쉽게 통신할 수 있다.

BLE의 주요 특징 중 하나는 고유한 프로파일 및 서비스 구조를 통해 기기 간의 통신을 표준화하는 것이다. GATT와 같은 프로파일을 사용하여 기기 간의 데이터 교환을 정의하고, 이러한 표준을 통해 다양한 제조사의 기기들이 서로 호환될 수 있도록 한다. 또한, 매우 빠른 연결 설정 시간을 제공하여, 기기 간의 통신이 즉각적으

로 이루어질 수 있다.

BLE는 또한 보안 측면에서도 강력한 기능을 제공한다. 암호화 및 인증 메커니즘을 통해 데이터 전송의 무결성과 기밀성을 보장하며, 이는 스마트 홈 환경에서 중요한 요소이다.

2.1.4 CPCd와 RCP

CPCd는 하나의 기기를 통해 여러 프로토콜을 동시에 통신할 수 있게 해주는 소프트웨어 데몬이다. 특히 IoT 환경에서 Thread, Zigbee, BLE와 같은 다양한 무선 통신 프로토콜을 동시에 사용할 수 있게 하여, 다양한 기기 간의 상호운용성을 크게 높인다.^[5]

이를 통해 사용자는 Thread, Zigbee, BLE 프로토콜을 모두 활용하여 네트워크를 구성하고, 각 프로토콜 간의 데이터를 실시간으로 교환할 수 있다. 다양한 통신 보드를 라즈베리파이와 같은 플랫폼에 연결하여 구현할 수 있으며, 이를 통해 다중 프로토콜 네트워크 환경을 조성한다.

RCP는 다양한 무선 통신 프로토콜을 동일한 시간에 효율적으로 모니터링하고 처리하는 데 중요한 역할을 하는 하드웨어 장치이다. RCP는 BLE, Zigbee, Thread와 같은 여러 무선 프로토콜을 동시에 수신하고 처리할 수 있다. 예를 들어, Thread 네트워크와 Zigbee 네트워크가 동시에 작동할 때, RCP는 각 네트워크에서 수신된 데이터를 실시간으로 모니터링하고, 프로토콜에 맞는 처리를 수행한다.

RCP의 주요 기능 중 하나인 동시 청취(Concurrent Listening)는 시스템 자원을 효율적으로 사용하여 여러 프로토콜을 동시에 처리하는 동안 발생할 수 있는 성능 저하를 최소화한다. RCP의 기능을 통해 다중 프로토콜 신호를 동시에 수신하고, 각 프로토콜에 맞는 데이터 패킷을 분석하고 적절히 대응할 수 있다.^[6,7]

2.2 통합 네트워크 관리 시스템

본 논문에서 제안하는 통합 네트워크 관리 시스템은 CPCd가 Thread, Zigbee, BLE 네트워크를 생성하고 관리하는 역할을 한다.

Thread 네트워크의 경우, CPCd를 통해 네트워크를 구성한 후 Ping을 통해 통신 상태를 확인하고 메시지를 전송할 수 있다. 이 과정에서 CPCd는 보더 라우터로 작동하여 다른 기기와의 원활한 통신을 보장하며, OMR 주소를 사용하여 IPv6 기반 통신을 가능하게 한다.

Zigbee 네트워크에서 CPCd는 코디네이터 역할을 수행하며, 기기 간의 메시지 전송을 관리하여 네트워크의 안정성과 확장성을 보장한다.^[8-10]

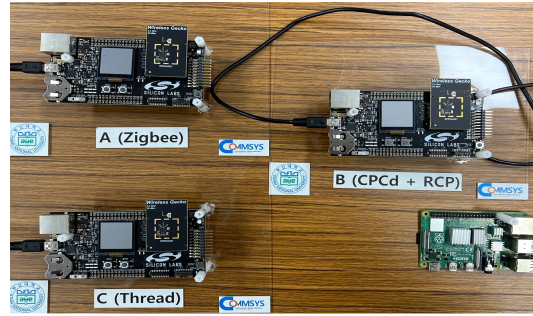


그림 3. 실험 기기 구성 및 연결 구조

Fig. 3. Experimental Device Configuration and Connection Structure

BLE 네트워크의 경우에는 기본적인 네트워크 구성 및 데이터 송수신 기능만을 제공하며, BLE 기기와의 직접적인 메시지 전송은 이후 실험에서 사용할 Simplicity Studio 버전 5에서는 지원되지 않는다. 이와 같은 CPCd의 기능들을 통해 다양한 프로토콜 간의 통합된 네트워크 환경을 구축하고 관리할 수 있다.

CPCd가 위와 같은 역할을 원활하게 수행하기 위해서 RCP를 함께 사용한다. RCP를 통해 다수의 프로토콜을 동시에 수신, 처리하고 동시 청취 기능을 통해 성능저하를 최소화한다.

마지막으로 Zigbee Direct 서비스를 통해 CPCd의 BLE 네트워크 부분의 부족한 기능을 보완한다.

두 기기가 BLE로 연결된 상태에서 BLE 기기가 Zigbee Direct 기기의 상태를 보고 받고 제어하는 동작을 수행할 수 있다.

III. 시스템 구현 및 실험

3.1 실험 환경 구축 및 수행

실험을 수행할 Linux Host로는 raspberry pi 4를, RCP와 Zigbee, Thread 디바이스로는 SiliconLabs사의 EFR32MG21 WSTK 통신 보드를 사용하였다. 디바이스 간의 거리는 약 2m로 동일하게 설정하였다. 통신 보드는 SiliconLabs사의 Simplicity Studio v5를 사용하여 실험에 필요한 기능을 수행하였다. BLE 디바이스와 프로그램으로는 각각 스마트폰과 SiliconLabs의 Simplicity Connect 애플리케이션을 사용했다.

구성할 통합 네트워크의 구조는 그림 4과 같다. 먼저 Linux Host에 CPCd와 Thread, Zigbee, BLE와의 네트워크 및 통신 수행을 위한 애플리케이션, 스택 등을 포팅했다. 이후 Linux Host와 RCP 통신 보드를 연결했다.

다음으로 Thread, Zigbee Direct 통신 보드를 컴퓨터

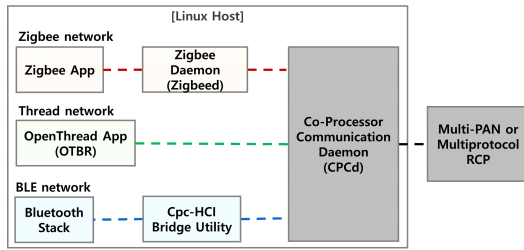


그림 4. CPCd와 RCP 시스템 구조
Fig. 4. System architecture of CPCd with RCP

와 연결하고 네트워크 설정을 초기화하였다. 이후 Linux Host에서 CPCd를 통해 Thread, Zigbee 네트워크를 생성하고 각 통신 보드를 프로토콜에 맞게 네트워크에 연결하였다.

마지막으로 스마트폰에서 Bluetooth와 Simplicity Connect 애플리케이션을 통해 Zigbee Direct 기기와 연결하고 Zigbee Direct가 BLE 연결을 성공한 로그를 확인하였다.

구축한 환경을 바탕으로 수행한 실험 순서는 그림 5와 같다. 먼저 CPCd와 Zigbee, Thread가 연결되어 있는지 테스트하기 위해 각각 “Zigbee Test”, “Thread Test”라는 텍스트 메시지를 송수신한다. 이후 Thread에서 CPCd를 거쳐 Zigbee로 향하는 LED 제어 명령을 송수신하여 Zigbee 디바이스의 LED의 상태를 제어한다. 이 과정에서 Thread와 Zigbee 네트워크는 각각 다른 무선 채널을 사용하며 RCP는 동시 청취 기능을 사용하여 통신에 간섭이 발생하지 않도록 한다.

이후 Zigbee 디바이스의 LED 상태의 변화가 BLE 디바이스, 스마트폰으로 보고된다. 마지막으로 BLE 디바이스에서 상태 변화를 확인하고 다시 한번 Zigbee 디바이스의 LED 제어 명령을 전송하여 상태를 변화시킨다.

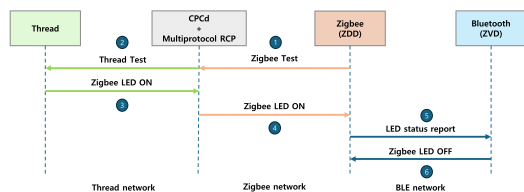


그림 5. 실험 플로우차트
Fig. 5. Experiment Flowchart

3.2 실험 결과 분석

송수신 과정에서 수집된 Received Signal Strength (RSS) 값은 -50 ~ -60dBm 사이의 강한 신호 세기로 측정되었다. RCP가 두 프로토콜의 기기들과 네트워크를

표 1. Thread 패킷 통신 결과

Table 1. Thread packet communication results

Packet length (byte)	Round-trip time (min) (ms)	Round-trip time (avg) (ms)	Round-trip time (max) (ms)
64	48	55.234	84
128	97	108.943	147
256	165	179.840	539
512	337	363.501	715

형성하는 환경에서도 통신 상태가 양호한 것으로 확인된다. Thread 기반 네트워크에서의 패킷 통신 결과는 표 1과 같다. 모든 경우에서 패킷 손실은 발생하지 않았다. 저전력 그리고 낮은 데이터 전송률의 무선 통신 프로토콜의 환경에서 주로 사용되는 패킷 길이를 기준으로 통신한 결과 타 프로토콜과의 충돌 없이 원활한 통신이 이루어졌다.

다음으로 CPCd를 통해 각각 Thread, Zigbee 기기들과 메시지를 주고받거나 제어 명령을 송수신하였고 Zigbee Direct 기기가 CPCd의 제어 명령을 수신하여 자신의 LED 상태를 변경하고 이를 BLE, 스마트폰에 보고하는 신호를 송신하였다. 또한 이후 BLE 디바이스, 스마트폰에서 LED 제어 명령을 수신하여 상태가 변화했고 다시 한번 상태를 보고하는 것을 확인하였다. 실험 과정을 녹화한 동영상은 아래 주소의 Github에서 확인할 수 있다.

<https://github.com/SeonghyeonPark24/Integration-and-Performance-Analysis-of-a-Multi-WPAN-Protocol-IoT-Network-Implementation>

IV. 결 론

본 논문에서는 다양한 무선 통신 프로토콜을 통합하여 IoT 네트워크의 상호운용성을 향상하는 방법을 제안하고 구현하였다. Thread, Zigbee, BLE를 결합한 네트워크 구성을 통해 각 프로토콜의 장점을 최대한 활용하고 기기들이 하나의 통합된 네트워크 내에서 원활하게 작동할 수 있도록 하였다. 이를 통해 네트워크 용량을 극대화하고 운영 효율성을 향상시킬 수 있었다.

실험 결과, CPCd와 RCP를 활용하여 Thread, Zigbee, BLE 네트워크를 동시에 모니터링하고 관리하는 것이 가능함을 확인하였다. CPCd는 RCP의 동시 청취 기능을 통해 여러 프로토콜의 데이터를 실시간으로 수신하고 처리할 수 있었다. 이를 통해 다양한 프로토콜 간의 상호운용성을 보장하고, 네트워크 성능저하를 최

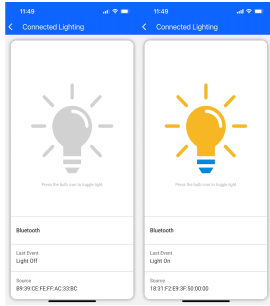


그림 6. BLE 기기가 받은 Zigbee Direct 상태 보고
Fig. 6. Status report received by BLE device from Zigbee Direct

소화할 수 있었다.

특히, Thread 네트워크에서는 보더 라우터를 통해 다른 네트워크와의 IPv6 기반 통신이 가능하였으며, Zigbee 네트워크에서는 Zigbee Direct를 활용하여 Zigbee와 BLE 기기 간의 직접적인 통신이 가능하였다. BLE 네트워크에서는 초기 설정 및 상태 모니터링을 통해 스마트 홈 기기들이 효율적으로 통신할 수 있도록 지원하였다.

본 연구는 스마트 홈 환경에서 다양한 IoT 기기들이 원활하게 통신할 수 있는 통합 네트워크의 구현 가능성을 보여주었으며, 향후 연구에서는 더욱 향상된 통합 네트워크 구조와 운영 방안을 개발하여 스마트 홈뿐만 아니라 산업용 IoT, 스마트 빌딩, 스마트 시티 등 다양한 분야에서 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 사용자의 편의성과 효율성을 높이고, IoT 네트워크의 확장성과 신뢰성을 보장할 수 있을 것이다.

본 논문의 연구 결과는 스마트 홈 IoT 생태계에서의 상호운용성 문제를 해결하는 데 중요한 기여를 할 것으로 기대된다. 앞으로의 연구를 통해 더욱 향상된 통합 네트워크 구조와 운영 방안을 개발하여, 다양한 IoT 기기들이 하나의 통합된 네트워크에서 효율적으로 상호 작용할 수 있도록 지원할 것이다.

References

[1] A. A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2347-2376, Jun. 2015.
(<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>)

[2] Y. S. Son and J. H. Park, "Current status and

future directions of home IoT technology," *J. KICS(Inf. and Commun. Mag.)*, vol. 32, no. 4, pp. 23-28, Apr. 2015.

- [3] Connectivity Standards Alliance, *CHIP is now Matter*(2021), Retrieved Aug. 12, 2024, from <https://csa-iot.org/newsroom/chip-is-now-matter/>
- [4] Connectivity Standards Alliance, *Zigbee Direct Specification 1.0*(2022), Retrieved Jun. 16, 2024, from <http://www.siliconlabs.com>.
- [5] Ö. Şeker and G. Dalkılıç, "Implementation and performance analysis of a multi-protocol gateway," in *Proc. 2022 IEEE Innovations in Intell. Syst. and Appl. Conf. (ASYU)*, Antalya, Turkey, Sep. 2022.
(<https://doi.org/10.1109/ASYU56188.2022.9925244>)
- [6] V. Q. Son and T. N. Duc, "Performance evaluation of dynamic multiprotocol with forwarding service on a radio co-processor," in *Proc. 2023 IEEE ISEE*, pp. 79-84, Ho Chi Minh City, Vietnam, Feb. 2023.
(<https://doi.org/10.1109/ISEE59483.2023.10299881>)
- [7] Silicon Labs, *AN1333: Running Zigbee, OpenThread, and Bluetooth Concurrently on a Linux Host with a Multiprotocol Co-Processor*(2023), Retrieved Jun. 16, 2024, from <http://www.siliconlabs.com>.
- [8] J. E. Balota and A.-L. Kor, "Brokerage system for integration of LrWPAN technologies," *MDPI Sensors*, vol. 22, no. 5, pp. 1733-1751, Feb. 2022.
(<https://doi.org/10.3390/s22051733>)
- [9] Y. Chen, M. Li, P. Chen, and S. Xia, "Survey of cross-technology communication for IoT heterogeneous devices," *IET Commun.*, vol. 13, no. 12, pp. 1709-1720, Jun. 2019.
(<https://doi.org/10.1049/iet-com.2018.6069>)
- [10] S. B. A. Khattak, M. M. Nasralla, H. Farman, & N. Choudhury, "Performance evaluation of an ieee 802.15.4-based thread network for efficient internet of things communications in smart cities," *MDPI Applied Sci.*, vol. 13, no. 13, pp. 7745-7768, Jun. 2023.
(<https://doi.org/10.3390/app13137745>)

박 성 현 (Seonghyeon Park)



2024년 2월 : 부산대학교 전자
공학과 졸업

2024년 3월~현재 : 부산대학교
전자 공학과 석사과정

<관심분야> 전자공학, 통신공
학

[ORCID:0009-0001-8292-4826]

김 석 찬 (Suk Chan Kim)



1993년 2월 : 부산대학교 전자
공학과 졸업

1995년 2월 : 한국과학기술원 전
자공학과 석사

2000년 2월 : 한국과학기술원 전
자공학과 박사

2011년 3월~현재 : 부산대학교
전자공학과 교수

<관심분야> 전자공학, 인공지능, 통신시스템

[ORCID:0000-0002-5699-8565]

주 재 한 (Jaehan Joo)



2018년 8월 : 부산대학교 전자
공학과 졸업

2022년 8월~현재 : 부산대학교
전기전자공학부 석박사통합
과정 수료

<관심분야> 전자공학, 인공지
능, 통신시스템

[ORCID:0009-0009-5271-8982]