

저전력 IoT 사물을 위한 통신 효율적 아키텍처

유명한¹, 김상경^{2*}

¹(주)봄커뮤니케이션 대표, ²국립강릉원주대학교 컴퓨터공학과 교수

Communication-Efficient Architecture for Low-Power IoT Things

Myung-Han Yu¹, Sangkyung Kim^{2*}

¹CEO, Bom Communication Inc.

²Professor, Department of Computer Science and Engineering, National Gangneung-Wonju University

요약 본 논문은 IP 기반 사물과 비 IP 기반 저전력 사물 모두를 포괄하며, 이들이 소셜 관계를 형성하여 효율적인 통신을 제공하는 새로운 IoT 아키텍처를 제안한다. 제안된 아키텍처는 새로운 응용 프로토콜 TinyAP-S를 포함하며, 이 프로토콜의 설계적 특징을 통해 게이트웨이 간 핸드오버 절차를 생략하여 IoT 플랫폼 전반의 통신 효율성을 높이는 데 중점을 둔다. 사물 간 또는 사물-사용자 간 관계는 Ownership, Partial Ownership, Guestship의 세 가지 유형으로 단순화되며, 위치 및 추천 기반 탐색 기능을 통해 효율적인 제어 및 관계 형성을 지원한다. 성능 평가 결과, TinyAP-S 프로토콜은 개선된 슬립 모드 운영을 통해 메시지 전송 횟수를 근본적으로 줄여 높은 에너지 효율을 보였다. 특히, 저전력 표준 프로토콜인 MQTT-SN과의 비교를 통해 동일 에너지 예산 내에서 TinyAP-S가 더 높은 에너지 효율을 달성했음을 확인하였다. 또한, 제안된 IoT 플랫폼은 기존 SIoT 플랫폼 대비 고밀도 환경을 가정한 실험에서 우수한 확장성을 확보했음을 보여준다.

주제어 : 소셜 사물 인터넷, 사물관계, TinyAP-S, CSIoT, SIoT

Abstract This paper proposes a novel IoT architecture that encompasses both IP-based and non-IP-based, low-power things, enabling them to form social relationships and provide efficient communication. The proposed architecture includes a novel application protocol, TinyAP-S, whose design features focus on improving communication efficiency across the IoT platform by eliminating handover procedures between gateways. Relationships between things and between things and users are simplified into three types: Ownership, Partial Ownership, and Guestship. Location- and recommendation-based navigation functions support efficient control and relationship formation. Performance evaluation results show that the TinyAP-S protocol significantly reduces the number of message transmissions through improved sleep mode operation, demonstrating high energy efficiency. In particular, comparisons with MQTT-SN, a low-power standard protocol, demonstrate that TinyAP-S achieves higher energy efficiency within the same energy budget. Furthermore, the proposed IoT platform demonstrates superior scalability in experiments assuming a high-density environment compared to existing SIoT platforms.

Key Words : Social Internet of Things, Social Relationship, TinyAP-S, CSIoT, SIoT

1. 서론

IoT 기술의 확산과 함께 기기종 장치 간의 호환성과 연결성을 확보하기 위한 다양한 연구가 이루어져 왔다. 초기에는 웹 기술을 활용한 WoT(Web of Things)[1]가 등장하였고, 이후 SNS 기반의 SWoT(Social Web of Things)[2,3], 전용 소셜 플랫폼을 중심으로 한 SIoT(Social Internet of Things)[4,5,6,7]로 발전하였다. 특히 SIoT는 사물 간 사회적 관계를 활용하여 네트워크 확장성과 신뢰성을 향상시키는 것을 목표로 한다.

그러나 많은 IoT 사물은 전력 공급이 어렵거나 배터리 교체가 비효율적인 환경에서 동작하기 때문에, 장치 수명을 좌우하는 통신 효율이 매우 중요하다[8,9,10]. 그럼에도 기존 SIoT 연구는 개념적 구조나 신뢰 관리 중심으로 이루어져, 저전력 사물의 에너지 절감을 위한 슬립 모드(sleep mode) 운영, 이동성을 가진 장치의 게이트웨이 연결 시 효율적 핸드오버 절차 등 실제 운영 환경의 핵심 문제는 충분히 다루지 못했다.

본 논문에서는 이러한 한계를 해결하기 위해 통신 효율을 중심으로 설계된 새로운 CSIoT (Communication-efficient Social IoT) 아키텍처를 제안한다. CSIoT 아키텍처는 게이트웨이와 사물 간 동기화된 슬립 모드를 통해 불필요한 전력 소비를 줄이고, 경량 응용 프로토콜을 도입하여 메시지 오버헤드와 핸드오버 절차를 최소화함으로써 네트워크 부하를 감소시킨다. 또한 사물 관계 유형을 Ownership, Partial Ownership, Guestship의 세 가지로 단순화하고, 위치 기반 및 추천 기반 탐색을 결합하여 데이터 전파 범위를 사전에 제한함으로써 에너지 효율과 확장성을 동시에 향상시킨다. 더 나아가 고밀도 환경과 사물 이동 시나리오를 고려한 성능 평가를 통해, CSIoT 아키텍처와 경량 프로토콜이 기존 SIoT 플랫폼 및 MQTT-SN 기반 구조 대비 에너지 소비, 전파 지연, 이동성 지원 측면에서 우수함을 실험적으로 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구를 분석하고, 3장에서는 제안하는 CSIoT 아키텍처를 설명한다. 4장에서는 주요 동작 메커니즘을 기술하고, 5장에서 성능 평가 결과를 제시한다. 마지막으로 6장에서는 결론을 정리한다.

2. 관련 연구

IoT 환경에서 장치 간 상호연결성 확보를 위한 대표

적 접근으로 WoT(Web of Things)가 제안되었다[1]. WoT는 REST 아키텍처를 기반으로 표준 웹 기술을 IoT 장치에 적용하여 웹 서비스 접근 방식을 그대로 확장할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 각 장치가 TCP/IP 스택을 탑재해야 하므로, 컴퓨팅 성능이 낮고 전력 제약이 큰 저전력 사물에는 적용이 어렵다는 한계를 가진다.

이러한 제약을 보완하기 위하여 SWoT가 제안되었다[2,3]. SWoT는 상용 SNS를 IoT 장치와 연동하여 관계를 구성하고 메시지 포스팅 기반으로 데이터 공유 및 제어를 수행한다. 이 접근 방식은 클라우드 기반 SNS 인프라 활용 측면에서 장점이 있으나, 장치 등록, 소유권 관리, 인증 절차 등 IoT 환경에서 필수적인 기능을 명확히 정의하지 않고 상용 SNS 모델에 의존하는 구조적 한계를 가진다.

이러한 문제를 해결하기 위해 SIoT가 제안되었다[4]. SIoT는 사물 간 또는 사물-사용자 간의 관계를 Ownership, Social, Service, Co-location, Co-work의 다섯 가지 유형으로 정의하고, 이를 통해 사물 간의 협업 및 지능적인 서비스 제공을 목표로 한다[4,5,6,7]. 이러한 소셜 관계 정의는 사물의 자발적인 연결성을 높이고 서비스 생성을 지원하는 데 중요한 역할을 수행하지만, 대부분의 연구는 관계의 개념적 설계에 집중되어 있으며, 실제 IoT 환경에서 중요한 저전력 장치 지원, 슬립 모드 기반 에너지 절감, 장치 이동성에 따른 효율적 핸드오버와 같은 실질적 운영 메커니즘은 충분히 제공하지 못했다.

한편, LPWAN이나 무선 센서 네트워크 환경에서 데이터의 물리적 전송 효율을 높이기 위한 다양한 기술이 연구되어 왔지만, 사회적 관계 모델과 결합되어 있지는 않다[8,9,10].

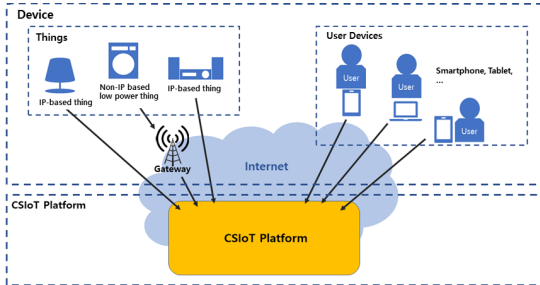
본 논문에서는 사회적 관계 원리를 기반으로 한 사물에 대한 소유 및 접근 권한 중심의 3가지 유형의 사물관계를 도입하고, 이를 활용하여 저전력 IoT 사물을 지원하는 통신 효율적 아키텍처를 제안한다.

3. CSIoT 아키텍처

Fig. 1은 제안된 CSIoT 아키텍처의 전체 구조를 보여준다. CSIoT 아키텍처를 구성하는 IoT 장치는 디바이스와 플랫폼으로 나뉘며, 디바이스는 사물, 게이트웨이, 사용자 디바이스의 세 유형으로 구분된다. 사물 간 또는 사물-사용자 디바이스 간에는 '사물관계'라 불리는 사회적 관계가 형성되며, 이 관계를 기반으로 정보 공유 및 전파

가 이루어진다.

사물관계는 Ownership, Partial Ownership, Guestship의 세 가지 유형으로 정의되며, 위치 및 추천 기반 탐색 절차를 통해 효율적으로 형성된다. 모든 사물관계 및 운영 데이터는 CSIoT 플랫폼에서 중앙 집중식으로 저장 및 처리되어, 관계 관리와 데이터 흐름 제어를 수행한다.



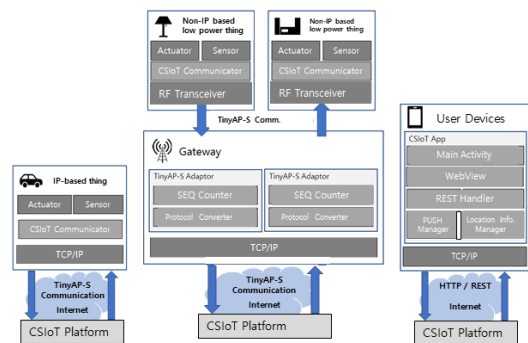
[Fig. 1] CSIoT architecture diagram

3.1 구성 요소

3.1.1 디바이스

사물은 IP 기반 사물과 비 IP 기반 저전력 사물로 구분된다. 자원이 충분한 IP 기반 사물은 유·무선 인터넷을 통해 플랫폼에 직접 접속한다. 반면, 비 IP 기반 저전력 사물(예: 센서)은 자체적으로 인터넷 연결 기능이 없어 게이트웨이를 통해 플랫폼과 연결된다.

게이트웨이는 비 IP 사물을 위한 중계 장치로, 자체 개발된 경량 응용 프로토콜인 TinyAP-S 어댑터를 내장하여 플랫폼과 양방향 데이터 교환을 수행한다. TinyAP-S는 저전력 IoT 장치를 위해 설계된 TinyAP[11]를 CSIoT 환경에 맞게 확장한 프로토콜이다. 게이트웨이는 통신



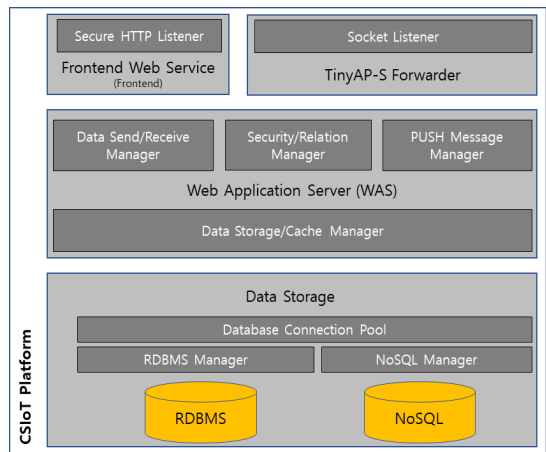
[Fig. 2] Device configuration and communication relationship with the platform

범위 내 다수의 저전력 사물을 수용할 수 있으며, 게이트웨이와 플랫폼 간의 통신에도 TinyAP-S가 사용된다.

사용자 디바이스는 스마트폰 또는 PC 기반 앱을 통해 플랫폼에 연결되며, 사용자를 대신하여 사물의 센싱 데이터 조회, 액추에이터 제어 및 설정값 변경 등 간접적인 데이터 교환 및 제어 작업을 수행한다. Fig. 2는 이러한 디바이스 유형과 CSIoT 플랫폼 간의 통신 구조를 나타낸다.

3.1.2 CSIoT 플랫폼

CSIoT 플랫폼은 다양한 디바이스에 서비스를 제공하는 클라우드 기반 인터넷 플랫폼으로, 가입 및 인증, 사물 탐색, 사물관계 형성 및 데이터 공유 등 핵심 기능을 수행한다. 플랫폼은 프론트엔드 웹 서비스, TinyAP-S Forwarder, 웹 애플리케이션 서버, 데이터 스토리지로 구성된다 (Fig. 3 참조).



[Fig. 3] System configuration of the CSIoT platform

프론트엔드 웹 서비스는 HTTP 기반의 REST API 요청을 처리하고, TinyAP-S Forwarder는 사물에서 수신된 TinyAP-S 프로토콜 요청을 처리한 후, 이들을 웹 애플리케이션 서버(WAS)로 모두 중계한다. WAS는 플랫폼의 핵심 로직을 담당하며, 데이터 송·수신 관리, 보안 관계 관리 (인증 및 권한 제어), PUSH 메시지 관리 등 다양한 컴포넌트로 구성된다. 데이터 스토리지는 플랫폼의 운영 데이터 영속성을 보장한다.

4. CSIoT 주요 메커니즘

4.1 TinyAP-S 응용 프로토콜

〈Table 1〉 Functional Differences between TinyAP and TinyAP-S Application Protocols

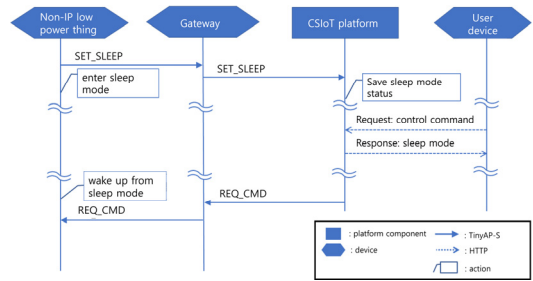
Function	TinyAP	TinyAP-S
address field length	2 bytes	4 bytes
platform integration	X	O
creating a thing ID	created and managed by the server	created by a thing, managed by the platform
sleep mode management entity	gateway	the platform
mobility support	X	O
location information transmission	X	O

TinyAP-S는 저전력 IoT 사물을 위한 경량 응용 프로토콜 TinyAP[11]에 CSIoT의 소셜 기능을 지원하도록 확장한 프로토콜이다. TinyAP 대비 TinyAP-S의 주요 변경 사항은 다음과 같다(Table 1 참조).

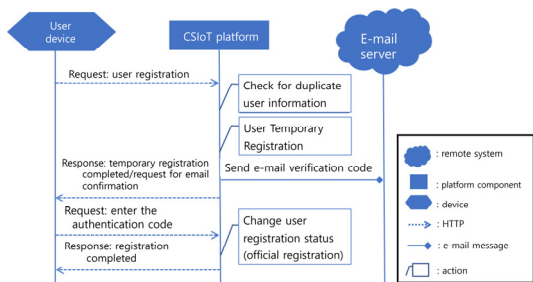
- 동기화 기반 슬립 모드: TinyAP-S는 플랫폼이 직접 관리하는 슬립/웨이크업 스케줄에 따라 게이트웨이와 동기화된 슬립 모드를 사용한다. 플랫폼은 사물이 깨어나는 시간에만 다운로드 데이터를 전송하여 사물의 불필요한 대기 전력을 제거하고 에너지 소비를 절감한다(Fig. 4 참조).
- 경량 핸드오버: TinyAP-S는 플랫폼 중심 구조를 활용하여 사물이 이동해도 게이트웨이 간 핸드오버나 재인증 절차 없이 데이터를 정상 수신할 수 있게 한다. 이는 시스템 확장성과 관리 효율성을 높인다.
- 주소 체계 확장: 주소 체계를 4바이트로 확장하여 CSIoT 환경의 사물 수용 능력을 확보하였으며, 사물관계·가입 절차 등을 지원하는 신규 메시지 타입들이 추가되었다.

4.2 사용자 가입 및 사물 등록

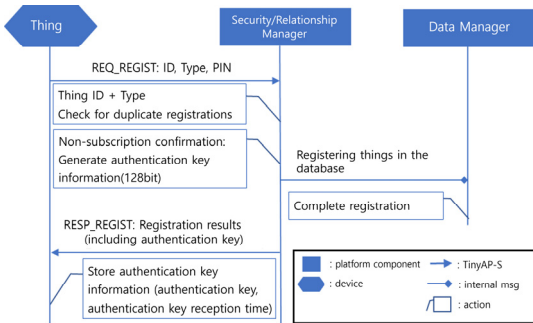
CSIoT 플랫폼에 접속하는 주체는 통신 및 접근 권한 획득을 위해 가입 및 인증 절차를 거친다. 사용자 디바이스는 일반 인터넷 환경을 사용하므로 HTTP로 가입 절차를 수행한다(Fig. 5 참조). 반면, 사물은 IP 기반/비 IP 기반 구분 없이 TinyAP-S 메시지를 통해 플랫폼에 등록된다. 사물 등록 시 사물 ID, 디바이스 타입과 함께, 사물의 물리적 소유자를 증명하는 핵심 보안 요소인 고유 키(사물의 PIN, 시리얼 번호 등)가 필요하다. 이 정보는 이후 Ownership 관계 설정을 위한 기반이 된다. Fig. 6은 사물 등록 절차를 나타낸다.



[Fig. 4] Control command transmission procedure in sleep mode



[Fig. 5] User registration procedure



[Fig. 6] Registration procedure for things

4.3 사물관계 형성

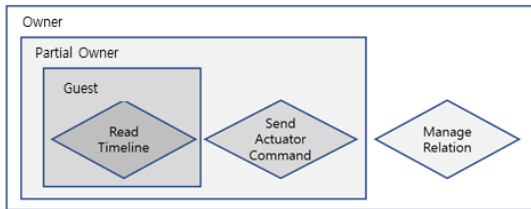
사물관계는 특정 사물의 정보 접근 및 제어 권한을 정의하는 소셜 기반 권한 모델이며, 데이터 게시 시 전파 대상을 결정하는 핵심 요소이다. 사물관계는 다음 세 가지 유형으로 단순화되어 불필요한 트래픽을 줄인다 (Fig. 7 참조).

- Ownership: 모든 조회 및 제어가 가능한 최상위 권한
- Partial Ownership: Owner가 허용한 일부 기능만 제어 가능한 중간 권한

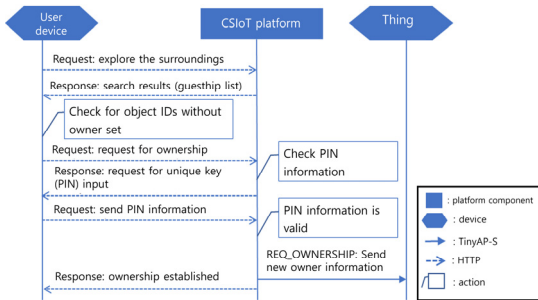
- Guestship: 공개된 최소 데이터만 조회 가능한 최소 권한

Ownership 관계 설정 절차를 Fig. 8에 나타내었다. Ownership 관계는 사용자가 주변에서 Owner가 없는 사물을 탐색한 후, 실제 소유를 증명하는 고유키를 입력하여 설정된다. 고유키가 일치하면 관계가 설정되며, 이 정보는 TinyAP-S를 통해 사물로 전송된다.

Partial Ownership 관계는 요청이 발생하면 플랫폼이 Owner에게 승인 여부를 확인하는 절차를 통해 형성된다. Owner가 수락할 경우 요청자에게 제한된 기능 접근 권한이 부여되며, 플랫폼은 이를 공식적인 관계로 등록한다.



[Fig. 7] Restrictions on accessible functions based on object relationships



[Fig. 8] Ownership relationship formation process

4.4 사물 탐색

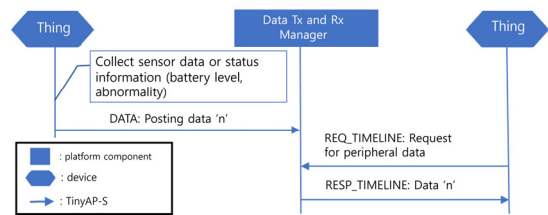
사물 또는 사용자는 관계 형성을 위해 위치정보와 과거 관계 기록을 활용한 두 가지 탐색 방식을 사용하며, 이를 통해 불필요한 통신 오버헤드를 줄인다.

- 위치 기반 탐색: 디바이스 위치를 기반으로 주변 사물을 조회한다. 플랫폼은 탐색 요청 시 Owner가 설정한 권한 및 변경 조건을 사전 필터링하여 네트워크 트래픽을 절감한다.
- 추천 기반 탐색: 사물 및 사용자 유형을 분석하고 과거 관계 형성 인기도를 기반으로 하며, 인기도가 높은 유형 중 위치가 가까운 사물을 우선 추천한다.

다. 이 방식은 광범위 브로드캐스팅 없이도 필요한 통신 파트너를 빠르게 찾아 저전력 사물의 에너지 소모를 줄인다.

4.5 데이터 게시 및 공유

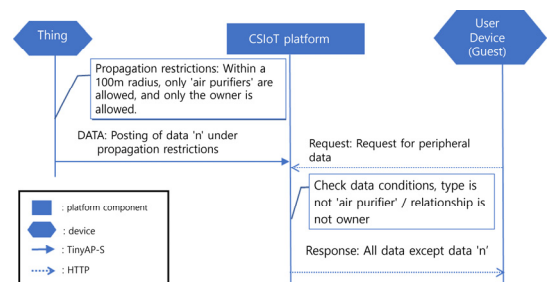
데이터 게시란 사물이 수집한 데이터를 플랫폼으로 전송하는 행위이며, 이 과정은 TinyAP-S 메시지로 수행된다(Fig. 9 참조). 플랫폼은 수신된 데이터를 타임라인 형태로 가공하여 HTTP 기반으로 사용자 디바이스에 반환한다.



[Fig. 9] Data posting example

통신 효율을 높이기 위해 CSIoT 아키텍처는 Owner가 설정한 전파 제한조건을 데이터에 첨부하도록 설계되었다. 이 조건은 플랫폼이 데이터를 전파하기 전 조건을 충족하지 않는 대상에게는 제공되지 않도록 사전 필터링하는 데 사용되며, 다음 세 가지 필터로 구성된다(Fig. 10 참조).

- 범위 제한: 데이터 게시 위치 기준으로 조회 가능 반경을 제한
- 디바이스 타입 제한: 조회 가능한 디바이스 타입 명시
- 권한 제한: 사물관계 수준에 따른 접근 제어
이 사전 필터링 메커니즘을 통해 전체 네트워크 트래픽을 줄일 수 있다.



[Fig. 10] Example of restricted transmission target

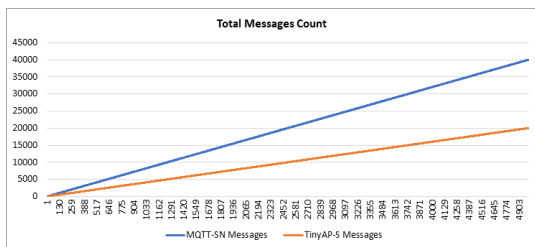
5. 성능 평가

CSIoT 플랫폼의 핵심 성능 요소인 TinyAP-S 프로토콜의 효율성과 CSIoT 아키텍처의 확장성을 검증하기 위해 Java 언어로 제작한 자체 시뮬레이터를 이용하여 MQTT-SN[12] 및 기존 SLoT[4] 플랫폼과 비교 평가를 수행하였다. TinyAP-S와 MQTT-SN의 주요 기능적 차이는 Table 2에 요약되어 있다. 슬립 모드 종료 - 사물 인증 - 인증키 갱신 - 데이터 게시 - 슬립 모드 재진입을 하나의 트랜잭션으로 정의하였다.

〈Table 2〉 Functional Differences between MQTT-SN and TinyAP-S application protocols

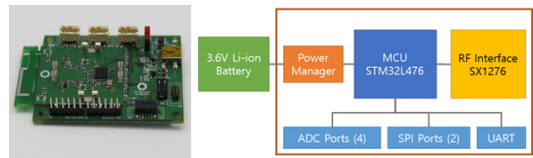
Function	TinyAP-S	MQTT-SN
operation mode	Client-Server	Publish-Subscribe
gateway handover	no specific procedures	connect after scanning
authentication	session key	session key
header size	7 bytes	5~8 bytes
messages per transaction	4	8
bytes per transaction	33	18

Fig. 11은 비 IP 기반 저전력 사물이 5,000회의 트랜잭션을 반복 수행할 때 교환된 메시지의 누적량을 보여 준다. TinyAP-S는 슬립 모드 재진입 시 별도의 제어 메시지를 요구하지 않는 구조적 특성 덕분에 MQTT-SN 대비 더 적은 메시지를 교환했다.



[Fig. 11] Total number of messages exchanged

에너지 소비 비교를 위해 Fig. 12의 비 IP 기반 사물을 구현하고, 두 개의 AA 알카라인 전지를 직렬로 연결하여 전원을 공급하였다. 실험 환경은 Table 3에 정리하였다.



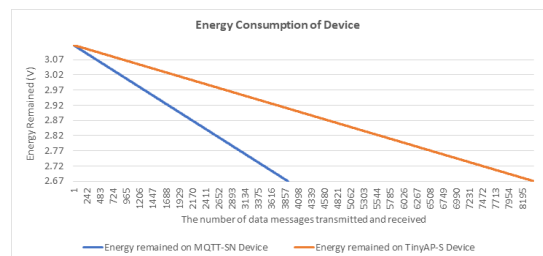
[Fig. 12] Non-IP based low power thing

〈Table 3〉 Energy consumption evaluation experimental environment

Item	Setting value
low-power thing MCU	STM32L4
wireless communication module	SX1276
transmission power	14dBm
message length	7bytes
measurement method	voltage drop-based power consumption measurement
number of messages sent	62000 times

측정 결과 초기 전압은 3.118V, 전송 이후 전압은 2.670V로 나타났으며, 해당 전압 범위는 알카라인 배터리의 방전 곡선에서 비교적 완만한 하강 구간에 해당하므로 선형 모델을 적용하여[13,14] 메시지 1회당 평균 전압 강하량은 약 7.2 μ V로 산출하였다.

시뮬레이션 공정성을 확보하기 위해 MQTT-SN에도 TinyAP-S와 동일한 소셜 기능 메시지를 추가했으며, 측정된 에너지 파라미터를 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 13은 두 프로토콜의 에너지 소비량을 비교한 결과이며, 사물 2대의 평균값이다. 실험 결과 TinyAP-S 사물은 MQTT-SN 사물 대비 40% 이상 높은 에너지 효율을 보였다. 이러한 차이는 MQTT-SN이 연결 유지-네트워크 형성 과정에서 더 많은 제어 메시지를 요구하고 메시지 길이 또한 길기 때문으로 분석된다.

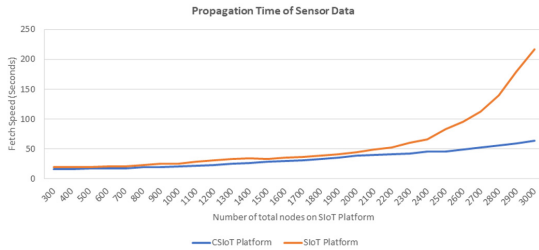


[Fig. 13] Terminal energy consumption by protocol

Fig. 14는 CSIoT와 SLoT[4]의 데이터 전파시간을 비교한 결과이다. 데이터 전파시간 T_{total} 은 다음과 같이 정의한다.

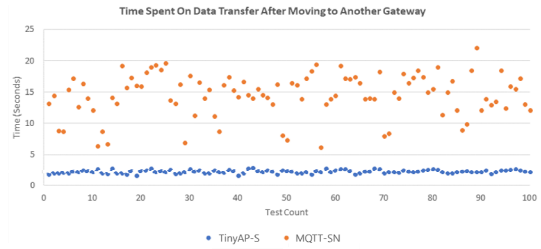
$$T_{total} = \sum_{i=1}^{N_{msg}} T_i$$

여기서 N_{msg} 는 데이터 전송 과정에서 발생한 전체 메시지 수, T_i 는 각 메시지의 전송 및 처리 시간이다. 실험은 반경 3km 내 5,000개의 사물과 사용자 디바이스가 분포한 스마트 시티나 산업용 IoT와 같은 고밀도 환경 [15]을 가정하고, 중심의 IP 기반 사물이 메시지를 게시할 때 반경 1km 내 사물 수를 300~3,000개까지 증가시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 CSIoT가 SIoT보다 전파시간이 더 짧게 나타났다. 이는 SIoT가 전체 데이터를 수집한 후 위치 조건으로 재필터링하는 후처리 방식이지만, CSIoT는 위치·디바이스 타입·권한에 기반한 사전 필터링을 수행하여 불필요한 데이터 처리를 줄이기 때문에 평가된다.



[Fig. 14] Data propagation time within the area

배터리 기반 저전력 사물은 고정된 위치에서만 동작하지 않으므로, 게이트웨이 간 이동성 지원은 중요한 요소이다. 이를 평가하기 위해, 비 IP 기반 저전력 사물이 기존 게이트웨이 A에서 새로운 게이트웨이 B로 이동한 뒤 CSIoT 플랫폼에 데이터를 전송하여 저장되기까지 걸리는 지연 시간을 시뮬레이션으로 측정하였다. TinyAP-S와 MQTT-SN을 사용하는 노드가 이동 후 ACK가 없는 메시지(비정기 센싱 데이터)를 1회 전송하고, 플랫폼이 이를 저장하기까지의 지연 시간을 각각 100회 측정한 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 실험 결과, TinyAP-S가 MQTT-SN보다 이동 후 전송 지연이 짧게 나타났다. 이는 TinyAP-S의 플랫폼 중심 연결 관리 구조에 기인한다. TinyAP-S 기반 사물은 게이트웨이 변경 시 CSIoT 플랫폼이 사물의 세션 정보를 지속적으로 유지하므로, 별도의 핸드오버 또는 재가입 절차 없이 즉시 데이터 전송이 가능하다. 반면, MQTT-SN 기반 사물은 새로운 게이트웨이에서 네트워크 가입 절차를 처음부터 다시 수행해야 하므로 더 긴 지연이 발생한다.



[Fig. 15] The time it takes for data to be transmitted after the thing is moved

6. 결론

본 논문은 비 IP 기반 저전력 사물을 포함한 다양한 IoT 장치가 안정적이고 효율적으로 데이터를 게시·공유·제어할 수 있도록, 소셜 관계 모델과 통신 효율화 기술을 통합한 새로운 CSIoT 아키텍처를 제안하였다. 제안한 아키텍처는 Ownership, Partial Ownership, Guestship의 세 가지 관계 유형을 중심으로 접근 권한을 단순화하고, 위치 기반 및 추천 기반 탐색 기능을 통해 데이터 전파 범위를 정교하게 제어함으로써 전체 네트워크 부하를 효과적으로 줄인다.

특히, 핵심 구성 요소인 TinyAP-S 응용 프로토콜은 플랫폼 중심의 동기화 슬립 모드, 경량 핸드오버 구조, 확장된 주소 체계 등을 통해 기존 MQTT-SN 대비 메시지 교환량 및 에너지 소비를 감소시킴을 실험적으로 확인하였다. 또한 사전 필터링 기반의 데이터 전파 방식은 기존 SIoT 플랫폼이 수행하던 후처리 기반 필터링 구조보다 높은 확장성과 더 짧은 전파시간을 제공함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

CSIoT 아키텍처는 스마트 시티나 스마트 공장과 같이 다수의 저전력 센서와 이동 사물이 혼재된 환경에서, 사물 이동이나 게이트웨이 변경 상황에서도 복잡한 핸드오버 절차 없이 안정적인 데이터 수집과 제어를 가능하게 한다. 또한 스마트 물류나 헬스케어 모니터링과 같이 배터리 교체가 어려운 환경에서는, 동기화 슬립 모드와 경량 통신 구조를 통해 장기간 운용과 운영 비용 절감에 기여할 수 있다.

본 논문에서는 프로토콜 및 아키텍처 수준에서의 상대적 비교와 경향 분석에 초점을 두었으며, 보다 정밀한 에너지 모델링과 다양한 하드웨어-전송 조건을 고려한 분석은 향후 연구로 확장할 계획이다. 또한 사물 인증 및 데이터 게시·조회 과정에서 발생할 수 있는 보안 취약점

을 보완하기 위해 경량 보안·인증 메커니즘을 강화하고, TinyAP-S 뿐 아니라 CoAP, MQTT-SN 등 범용 IoT 프로토콜을 CSIoT 플랫폼에 통합 지원함으로써 플랫폼 활용성을 높이는 방향으로 연구를 진행할 예정이다.

REFERENCES

[1] D. Zeng, S. Guo and Z. Cheng, "The Web of Things: A Survey," *Journal of Communication* Vol.6, No.6, pp.424-438, 2011.

[2] T. Chung, I. Mashal, O. Alsaryrah, V. Huy, W-H. Kuo and D. P. Agrawl, "Social Web of Things: A Survey," in *International Conference on Parallel and Distributed Systems*, Seoul, IEEE, pp.57-575, 2013.

[3] M. You and S. Kim, "Improvement of SWoT-based Realtime Monitoring System," *KIPS Transactions on Computer and Communication Systems*, Vol.4, No.7, pp.227-234, 2015.

[4] L. Atzori, A. Iera, G. Morabito and M. Nitti, "The Social Internet of Things (SIoT)-When Social Networks Meet the Internet of Things: Concept, Architecture and Network Characterization," *Computer networks*, Vol.56, No.16, pp. 3594-3608, 2012.

[5] A. Khelloufi et al., "A Social-relationship-based Service Recommendation System for SIoT Devices," *IEEE Internet of Things Journal*, Vol.8, No.3, pp.1859-1870, IEEE, 2021.

[6] M. Hosseinzadeh, V. Mohammadi, J. Lansky, and V. Nulicek, "Advancing the Social Internet of Things (SIoT): Challenges, Innovations, and Future Perspectives," *Mathematics*, Vol. 12, No. 5, 715, 2024.

[7] C. Marche, G. Soma and M. Nitti, "A Cognitive Social IoT Approach for Smart Energy Management in a Real Environment," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, Vol. 20, No. 4, pp.4061-4072, 2023.

[8] K.N. Reddy, A. Shukla and S. Sivasubramanian, "Energy-Efficient IoT Data Aggregation Framework Using Low-Power Wide-Area Networks," In *Proceedings of the 2024 International Conference on IoT, Communication and Automation Technology*, Gorakhpur, India, 23-24 November, 2024.

[9] H. M. Alsharif, A. H. Kelechi, A. Jahid, R. Kannadasan, M. K. Singla, J. Gupta and Z. Geem, "A Comprehensive Survey of Energy-efficient Computing to Enable Sustainable Massive IoT Networks," *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 91, pp.12-29, 2024.

[10] A. Kumar, B. Ashreetha, A. M. Reddy, S. Dekka, D. Gowda V and KDV Prasad, "Maximizing Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks for IoT with Advanced Techniques and Solutions," in *Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Computing and Social Networking*, Salem, India, May

14-16, 2025.

[11] M. You and S. Kim, "TinyAP: Lightweight application protocol for LoRa environment," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.43, No.1, pp.27-36, 2018.

[12] A. Stanford-Clark and H. Truong, "MQTT for sensor networks (MQTT-SN) protocol specification version 1.2," IBM, 2013.

[13] Energizer, *Energizer Alkaline AA (LR6) Battery Product Datasheet*, Energizer Holdings, 2022.

[14] Duracell, *Alkaline-Manganese Dioxide Battery, AA (MN1500) Technical Data Sheet*, Duracell, 2023.

[15] Thakur, B. "Energy-Aware Network Management for IoT Devices in Smart Cities," *Smart Internet of Things*, vol. 1, no. 3, pp.191-197, 2024.

유 명 한(Myung-han Yu)

[정회원]



- 2009년 2월 : 국립강릉원주대학교 컴퓨터공학과 학사
- 2011년 2월 : 국립강원대학교 전자공학과 석사
- 2018년 2월 : 국립강릉원주대학교 컴퓨터공학과 박사

- 2017년 1월 ~ 2020년 12월 : (주)하이테크 선임연구원
- 2021년 1월 ~ : (주)빅데이터커뮤니케이션 대표

<관심분야>

사물인터넷, AI, 네트워크

김 상 경(Sangkyung Kim)

[정회원]



- 2004년 3월 ~ : 국립강릉원주대학교 컴퓨터공학과 교수
- 1994년 3월 ~ 1995년 2월 : TINA 국제 컨소시엄 core member
- 1989년 3월 ~ : KT 통신연구소 선임연구원(부장)

- 1987년 3월 ~ : 삼성전자 주임연구원
- 1985년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사
- 1987년 2월 : 고려대학교 전자공학과 석사
- 2002년 2월 : 고려대학교 전자공학과 박사

<관심분야>

사물인터넷, 모바일 네트워크