

마이크로그리드 설비 관리를 위한 ZigBee 트리 기반 확장 토폴로지 구성 알고리즘

이 현 국*, 김 승 구°

ZigBee Tree-Based Scalable Topology Organization Algorithm for Microgrid Facility Management

Heonguk Lee*, Seungku Kim°

요 약

마이크로그리드는 독립된 분산전원을 활용하여 전력의 자급자족이 가능한 분산전력시스템이다. 마이크로그리드에서 전력 데이터 관리를 위해 사용하는 통신 방식에는 PLC, Ethernet, WiFi, ZigBee, Bluetooth, 6LoWPAN 등이 있다. ZigBee는 근거리 저전력 무선통신 기술로 좁은 지역에 밀집되어 있는 설비를 모니터링하기 위해 적합한 기술 중 하나이다. ZigBee는 태양광, 풍력 발전 설비, 홈 네트워크 등의 실내외 다양한 마이크로그리드 환경에 적용 가능한 기술로 연구되고 있다. 설비의 특성마다 관리 면적과 분포가 다르기 때문에 효과적으로 네트워크를 구성하기 위한 방법에 대한 고려가 필요하다. 본 논문에서는 다양한 마이크로그리드 환경에 적용 가능한 ZigBee 트리 기반의 확장성이 용이한 토폴로지 구성 알고리즘을 제안한다. 제안하는 토폴로지 구성 알고리즘은 네트워크의 확장성을 고려하여 토폴로지를 구성하기 때문에 ZigBee 표준 토폴로지 구성 방식에 비해 관리대상 설비가 넓게 분포한 경우 유리한 기술이다. OMNeT++ 시뮬레이션을 통해 제안하는 알고리즘의 성능을 트리 토폴로지에 참여한 노드 수, 링크의 신뢰성 측면에서 분석하였다.

Key Words : Microgrid, Scalable Topology, Tree Organization, WSN, ZigBee

ABSTRACT

The Microgrid is a distributed power system that can utilize independent distributed power sources to provide power self-sufficiency. Communication methods used for power data management in Microgrid are PLC, Ethernet, WiFi, ZigBee, Bluetooth, and 6LoWPAN. ZigBee is one of the best technologies for monitoring equipment that is tightly crowded in a small area with short-range, low-power wireless technology. ZigBee is being studied as a technology applicable to various indoor and outdoor Microgrid environments such as photovoltaic/wind power facilities, and home networks. ZigBee should be considered to a method for effectively configuring a network since the management area and distribution are different for each facility. In this paper, we propose a scalable topology organization algorithm based on ZigBee tree applicable to various Microgrid environments. Since the proposed topology organization algorithm constructs the topology considering the scalability of the network, it is an advantageous technique when the managed facilities are widely distributed compared to the ZigBee standard topology configuration method. Through the OMNeT++ simulation, the performance of the proposed algorithm is analyzed in terms of the number of nodes participating in the tree and reliability of the link.

* 본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음 (과제번호: R17XA05-69)

• First Author : (ORCID:0000-0002-5668-9279)Chungbuk National University, heonguklee@cbnu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-3512-5407)Chungbuk National University, kimsk@cbnu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201806-B-013-RN, Received May 30, 2018; Revised August 29, 2018; Accepted August 29, 2018

1. 서 론

세계 전력산업은 전력 수요의 증가, 에너지 고갈, 환경오염, 전력시스템 노후화 등의 문제에 직면해 있다^[1]. 특히 전력 수요의 증가로 많은 양의 전력을 안정적으로 제공하기 위하여 전력 회사는 다량의 예비 전력을 생산하고, 생산과 수요의 불균형으로 사용되지 않은 많은 양의 전력이 낭비된다. 과거부터 현재까지 전력의 수요는 꾸준히 증가하였다. U.S. Energy Information Administration(EIA)에 따르면, 미국 전력 생산량은 과거 20년 사이에 64% 증가하였고 20년 후에는 45% 더욱 증가할 것으로 예상하였다. 계속된 전력 수요의 증가로 전력 생산 시스템의 방향이 Distributed Generation(DG)로 변화하였다. DG는 태양광, 풍력 발전과 같은 Distributed Energy Resources (DER)를 이용하여 각 소비자가 전력을 생산하는 분산형 발전을 의미하며, 이를 통해 중앙 집중식 전력망의 부하를 줄일 수 있다^[2]. 효율적인 전력 수요를 위해 DG를 이용하여 독립적으로 전력을 생산하고 소비하는 분산전력시스템을 마이크로그리드라고 한다.

마이크로그리드는 DG, Energy Storage System (ESS), 부하 제어, 독립형 모드와 계통연계형 모드의 변환 기능을 수행하는 분산전력시스템이다. 마이크로그리드는 과거 공급자가 소비자에게 단방향으로 전력을 제공해주었던 전력망과 달리 소비자도 전력을 생산하여 에너지를 자급자족하는 전력시스템이다. 마이크로그리드에서는 기존의 중앙 집중식 전력망(Macrogrid)과 연결되어 전력을 사용하는 계통연계형 모드와 독립적인 분산 전원 및 저장 시스템과 연결되어 전력을 사용하는 독립형 모드가 있다^[3]. 중앙 집중식 전력망에서 생산한 전력량이 많이 남을 때 계통연계형 모드를 사용하여 저렴하게 전력을 사용할 수 있고, 독립적으로 생산한 전력량이 많을 때 독립형 모드를 사용하여 자급자족하거나 전력을 판매할 수 있다. 두 가지 방식을 자유롭게 변환하며 사용하기 때문에 경제적인 전력 소비가 가능하다. 마이크로그리드는 신재생에너지와 같은 다양한 분산 전원을 독립적으로 사용하여 여유 전력을 확보하기 때문에 전력 소비가 많은 피크타임이나 정전과 같은 긴급한 상황에서 전력을 공급받을 수 있다. 또한 전력 모니터링을 통해 수요와 공급에 관한 데이터를 수집하고 분석하여 효율적으로 전력을 관리할 수 있다.

마이크로그리드 환경에서 전력의 수요와 공급에 대한 데이터 수집을 위해서는 유무선 통신 기술을 활용

할 수 있다. 유선 통신 기술에는 Power Line Communications(PLC), Digital Subscriber Lines (DSL), Optical Power Ground Wire(OPGW), Ethernet 등이 있다^[4]. 이 중에서 PLC는 전력선에 전력의 세기보다 미약한 고주파(수십KHz~수십MHz) 통신 신호를 전송하여 상호간의 양방향 통신을 구현한다. 기존에 설비되어 있는 비전 선로의 전력선을 이용하여 통신망을 구축할 수 있기 때문에 투자 대비 통신 신뢰성이 가장 높아져 주로 사용된다. 그러나 외부 잡음을 차단하도록 설계된 통신 케이블들과 달리 전력선은 유·무선 잡음에 노출되어 있어서 다양한 감쇄 요인을 가지고 있고, 전력과 신호를 결합해주는 장치나 잡음 필터 등의 추가 장치가 필요하다는 단점이 있다^[5]. 무선 통신으로는 ZigBee, WIMAX, WiFi, Bluetooth, LPWA 등이 있다. ZigBee는 IEEE 802.15.4의 PHY 및 MAC 계층을 기반으로 한 저전력 근거리 무선 통신방식으로 홈 마이크로그리드에서 가장 많이 사용되는 기술이다^[6]. ZigBee의 짧은 통신 거리 때문에 태양광·풍력 분산 발전 설비, 캠퍼스·빌딩과 같은 넓은 범위의 마이크로그리드 네트워크에서 활용하기 위하여 멀티홉 통신 방식을 사용한다^[7]. 멀티홉 통신에서 시작 노드가 통신 범위 밖에 있는 목적지 노드까지 통신하기 위해 전송한 데이터는 하나 이상의 전달 노드를 거친다. 시작 노드와 목적지 노드 사이에 전달 노드들이 많다면 빈번한 데이터 전달이 발생하여 목적지 노드까지의 데이터 전달이 지연된다. 신속하게 데이터를 전달하기 위해서는 시작 노드와 목적지 노드 사이의 홉 수를 최소화해야 한다. 홉 수를 최소화 하려면 가장 멀리 있는 전달 노드에게 데이터를 전달해야한다. 하지만 거리가 먼 노드 간의 데이터 전달은 통신 신뢰성의 저하를 가져올 수 있기 때문에 안정된 신뢰성을 유지하며 홉 수를 최소화 하는 방법이 필요하다. ZigBee에서 멀티홉을 지원하는 토폴로지는 트리와 메쉬이다. 마이크로그리드 환경에서 메쉬 토폴로지는 네트워크 장치들이 개별적으로 동작하기 때문에 총체적인 관리가 어렵다. 트리 토폴로지는 계층적인 네트워크 구조를 형성하여 체계적인 전력 데이터 서비스 제공이 가능하고 장치들의 유지보수 및 관리에 유용하다. 본 논문에서는 넓은 마이크로그리드 환경에서도 안정적인 신뢰성을 가지고 통신할 수 있도록 ZigBee 트리 기반의 확장 토폴로지 구성(Scalable Topology Organization, STO) 알고리즘을 제안하였다.

STO 알고리즘은 ZigBee의 트리를 기반으로 확장된 네트워크를 형성할 수 있는 방법을 제공한다. STO

알고리즘은 초기 네트워크 구성 시 시드(seed) 노드를 선정하여 네트워크를 확장한다. 기존의 ZigBee가 강한 신호 세기를 가진 연결을 선택하며 네트워크를 형성하는 반면 STO 알고리즘은 PRR(Packet Reception Ratio)이 100%인 약한 신호 세기를 가진 연결을 선택하며 다방향으로 확장해나가는 시드 노드를 생성한다. 그리고 시드 노드를 중심으로 클러스터를 구성하기 때문에 넓게 확장된 네트워크를 형성할 수 있다. 기존의 ZigBee는 연결 과정에서 네트워크가 소형화되고, 부모-자식 사이의 연결이 선착순으로 이루어지는 문제가 발생한다. STO 알고리즘은 ZigBee의 선착순 연결로 인한 문제를 해결하여 다양한 마이크로그리드 환경에서 가능한 것으로 기대된다.

저자는 OMNeT++ 시뮬레이터를 이용하여 마이크로그리드 환경에 따라 센서 노드를 그리드형, 랜덤형으로 배치하고 ZigBee와 STO 알고리즘으로 형성한 트리 토폴로지의 네트워크 성능을 비교하였다. 그 결과 STO 알고리즘을 사용했을 때의 네트워크에 포함된 노드 수가 ZigBee의 네트워크 노드 수보다 11~14% 많은 수를 가졌다. 네트워크 신뢰성을 분석하기 위해 링크의 RSSI(Received Signal Strength Indicator)를 측정하였다. 평균 RSSI는 STO 방식의 네트워크가 ZigBee의 네트워크와 비슷하거나 최대 20dBm 높은 값을 보였다. 시뮬레이션 결과를 통해, STO 네트워크가 ZigBee 네트워크와 유사한 신뢰성을 가지면서 확장된 네트워크를 형성하여 더 많은 수의 노드를 네트워크에 포함시킬 수 있음을 확인하였다.

본 논문은 2장에서 ZigBee 무선 통신 기술이 사용되는 실제 마이크로그리드 환경의 네트워크 토폴로지를 분석하고, 3장에서 마이크로그리드 통신과 관련된 연구와 함께 ZigBee에 대하여 자세히 설명한다. 4장에서는 저자가 제안한 ZigBee 트리 기반 확장 토폴로지 구성 알고리즘에 대해 살펴본다. 5장에서는 실제 마이크로그리드 환경과 동일한 시뮬레이션 환경에서 ZigBee 트리 토폴로지 형성 방식과 저자가 제안한 알고리즘을 각각 적용하였을 때의 실험 결과를 비교 분석하고, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. 마이크로그리드 환경에서의 토폴로지

마이크로그리드 환경에서 데이터를 수집하고 통신하는 센서들은 환경, 응용, 요구사항 등에 따라 다양한 형태로 배치 가능하다. 센서들의 배치 특성에 따라 통신 방식 선택과 네트워크 토폴로지 구성이 가능하다. 본 장에서는 마이크로그리드 환경에서 설비 관리

를 위한 센서 장치의 물리적인 토폴로지 구성에 대해 분석한다.

2.1 마이크로그리드 환경의 토폴로지 구성

2.1.1 태양광 분산 발전

LG 태양 태양광 발전소는 300,000m²의 부지에 70인치의 모듈 69,000개가 설치되어 실제로 운영하고 있다. PV(Photo Voltaic) 모듈의 크기는 가로 2.5m 세로 2m 정도이며, PV 어레이는 PV 모듈을 10개 붙인 것과 같아서 10m*5m의 크기를 가진다. PV 어레이당 하나의 센서가 설치되는 경우 PV 어레이의 크기를 고려하여 10,000m² 당 약 200개의 센서가 그리드 형태로 배치 가능하다.

2.1.2 풍력 분산 발전

제주 가시리 풍력발전소에서는 2,045,000m²의 부지에 10개의 풍력 발전기가 설치되어 작동한다. 이러한 풍력 분산 발전은 넓은 부지에 풍력 발전용 터빈을 배치하기 때문에 유선 이더넷을 이용해 네트워크를 형성한다. 각각의 풍력 발전기 사이에 대한 정보 전달 이외에도 풍력 발전기 내부에 다수의 센서가 수집한 데이터를 전달해 주기 위해 사용된다. 일반적으로 하나의 발전기 내에서는 약 9개의 센서가 배치된다. 제주 가시리에서 사용한 풍력 발전기 V164는 높이가 105m이고 Blade Root의 폭이 4.6m인데, 9개의 센서가 균일하게 배치되었을 때 센서들은 약 10m 간격을 가지며 선형으로 위치한다.

2.1.3 홈 마이크로그리드

홈 마이크로그리드의 규모는 일반적인 하나의 주택 정도의 크기이며 사용하는 가전제품, 분산 발전 등에 따라 센서의 수가 달라진다. 일반 가정집의 크기는 약 80평(약 256m²)이고 20개 이하의 가전 기기를 사용하기 때문에 20개의 센서가 랜덤형으로 배치되며 네트워크 내에 있는 가전 기기들의 전력 소비 패턴을 분석하고 효율적으로 관리한다.

2.1.4 캠퍼스 및 빌딩 마이크로그리드

캘리포니아 공학대학 캠퍼스에서는 약 920,000m²의 부지에 90개의 마이크로그리드 환경을 조성하였다. 하나의 마이크로그리드 환경이 약 10,000m²의 규모를 가지고 캠퍼스 및 빌딩에서 사용하는 전자 기기의 수는 일반적으로 약 200개이다. 이 경우 200개의 센서는 랜덤형으로 배치되어 캠퍼스 혹은 건물의 모든 전자 기기들의 피크 시간대를 분석하고 에너지 저장 시

스택과 연계하여 합리적인 전력 사용 및 비용 지출을 가능하게 한다.

2.2 마이크로그리드 환경의 토폴로지 분석

마이크로그리드 환경의 네트워크 토폴로지는 센서의 배치, 네트워크 면적, 센서의 수에 따라 분류할 수 있다. 센서의 배치에 따라, 태양광 분산 발전은 그리드형, 풍력 분산 발전은 선형, 홈 마이크로그리드와 캠퍼스·빌딩 마이크로그리드는 전자 기기들이 임의의 위치에 존재하여 랜덤형 토폴로지로 나뉜다. 네트워크 면적에 따라, 태양광 분산 발전과 캠퍼스·빌딩 마이크로그리드는 10,000m² 이상의 넓은 지역, 풍력 분산 발전과 홈 마이크로그리드는 500m² 이하의 좁은 지역으로 분류된다. 센서의 수에 따라, 태양광 분산 발전과 캠퍼스·빌딩 마이크로그리드는 200개의 센서가 필요하며, 풍력 분산 발전과 홈 마이크로그리드는 20개 이하의 센서로 운용 가능하다.

저전력 근거리 무선 통신 방식인 ZigBee의 경우, 풍력 분산 발전과 홈 마이크로그리드와 같이 좁은 지역에 소수의 센서를 가진 네트워크에서는 스타 토폴로지를 적용한 원 홈 통신이 가능하다^[8]. 반면 태양광 분산 발전과 캠퍼스·빌딩 마이크로그리드와 같이 넓은 지역에 다수의 센서를 가진 네트워크에서는 대부분의 센서들이 통신 반경 내에 존재하지 않기 때문에 트리 및 메쉬 토폴로지를 적용한 멀티홉 통신을 통해 구현될 수 있다. 따라서 ZigBee는 다양한 종류의 마이크로그리드 환경을 모니터링 할 수 있는 저전력 무선 통신 기술이다.

ZigBee를 이용하여 작은 규모부터 큰 규모까지의 모든 마이크로그리드 환경을 제어 및 관리하기 위해 적합한 토폴로지는 트리와 메쉬 토폴로지이다. 이 중 메쉬 토폴로지는 다수의 센서 노드들이 밀집하여 위치한 마이크로그리드에서 다량의 통신 오버헤드를 발생시키고 센서 노드들의 전력 데이터를 싱크 노드로 전달하기 위해 복잡한 라우팅 기법을 요구한다. 반면 트리 토폴로지는 구성된 부모-자식 관계대로 통신하기 때문에 센서 노드가 많아도 상대적으로 통신 오버헤드가 적고 센서 노드들의 전력 데이터를 싱크 노드까지 전달하기에 용이하다. 그러나 기존의 트리 토폴로지는 신호 세기를 기반으로 부모-자식 관계의 네트워크를 형성하기 때문에 실질적으로 광범위하게 분산된 센서 노드들을 모두 네트워크에 포함시키지 못한다. 이러한 문제로 인해 마이크로그리드 환경에서 임의의 센서 노드들은 전원이 켜져있어도 통신하지 못하는 현상이 발생한다. 마이크로그리드 내에서 센서

노드의 전력 데이터가 누락되면 전력 생산과 소비의 균형을 방해한다. 따라서 ZigBee를 이용한 마이크로그리드 환경에서는 정확한 전력 관리를 위해 광범위한 네트워크를 형성할 수 있는 새로운 토폴로지 구성 방식이 필요하다.

III. 관련 연구

현재 다양한 마이크로그리드 환경에서 여러 통신 기술들이 사용되고 있다. Made A. Setiawan^[9] 등은 마이크로그리드에 적용되는 여러 유·무선 통신에 관하여 분석하였다. 대부분의 전력망에서 사용되는 유선 통신기술은 직렬 통신(RS-232/433/485), 버스 통신(ModBus, ProfiBus, CANBus), 전력선 통신(DLC, PLC, BPLC), 이더넷 통신(LAN, 광통신)이 있다. 반면 전력망에서 사용되는 무선 통신기술에는 Cellular, WiFi, WiMax, ZigBee, Z-Wave, Bluetooth, Insteon, Radio frequency, Microwave 등이 있다. 유선 통신기술은 넓은 데이터 전송 대역과 높은 신뢰성을 갖지만 설치비용이 상대적으로 비싸다. 반면 무선 통신기술은 설치비용이 저렴하고 고립된 지역에서 원격 제어가 필요할 때 더욱 유용하다. 또한, 지속적인 연구를 통해 미래에 꾸준히 발전 가능한 기술로써 잠재력을 가진다. 현재 전력망의 미터기나 센서들의 수가 증가함에 따라 유선 통신기술의 설치 비용문제가 대두되기 때문에 무선 통신기술이 마이크로그리드 환경에서 더욱 선호되는 기술이다. 마이크로그리드에 적용할 수 있는 무선 통신기술들은 표 1에 정리하였다.

여러 무선 통신기술들 중에서 ZigBee는 전력망에서 데이터를 전송하기 위하여 널리 사용되고 있다. Made A. Setiawan^[10] 등은 마이크로그리드에서 신뢰성 있는 데이터 통신을 위한 데이터 코딩 방법을 개발하였고, Giuseppe Stanculescu^[11] 등은 British Columbia Institute of Technology(BCIT) 마이크로그리드 캠퍼스 지역에서 부하 제어 장치, 스마트 미터기, 온도 센서들에 ZigBee를 적용하여 WiFi와의 간섭 관계에 대한 해결책을 제시하였다. 비슷하게 Peizhong Yi^[12] 등은 스마트 그리드 어플리케이션으로 ZigBee를 내세우며 WiFi와의 간섭 모델을 분석하였다. Yu-kai Chen^[13] 등은 DC 마이크로그리드 시스템의 모든 하위 시스템 모니터링에 ZigBee가 사용되었고, Norman C. F. Tse^[14] 등은 전력망 어플리케이션에서 ZigBee를 이용하여 실시간 데이터 전송 및 측정을 하고 데이터를 압축하는 알고리즘에 대해 제안하였다. 이와 같이 ZigBee는 마이크로그리드에 적용 될 수 있

표 1. 마이크로그리드 환경에 적용 가능한 무선 통신 기술들 비교[9]
 Table 1. Comparisons of wireless communication technologies applicable for Microgrid environment [9]

Tech.	Range	Data rate	Frequency	Routing	Security	Suitable	Modulation	Cost
Celluar	several km	270kbps	900, 1800MHz (2G), 2.1GHz (3G)	Direct	64bit A5/1, KASUMI cipher (3G)	backbone	GMSK	high
WiFi	100m	54Mbps	2.4GHz	more than 70 protocols	WPA	backbone	QPSK, BPSK, 16/64QAM	middle
WiMax	several km	30-40 Mbps	2.3, 2.5, 3.5 GHz	AODV, DSR, OLSR, ZRP	AES, 3DES	backbone	BPSK, QPSK, 16/64QAM, OFDMA-PHY	middle
ZigBee	100~1500m	250kbps	2.4GHz, 868, 915MHz	AODV, HERA	AES	end devices	OQPSK, BPSK	low
Z-Wave	30m	100kbps	900MHz	source-routed mesh network	Unique ID	end devices	GFSK	low
Insteon	50m	38kbps	900MHz	send & receive	Unique ID	end devices, backbone	BPSK	low
Bluetooth	100m	24Mbps	2.4GHz	master-slave structure	encryption key	end devices, backbone	GFSK, DQPSK, 8DPSK	low

고 꾸준한 연구를 통해 전력망 시스템에 더욱 적합한 무선 통신기술로 발전하고 있다.

ZigBee는 ZigBee Alliance에서 IEEE 802.15.4 표준을 기반으로 개발하였다. ZigBee는 IEEE 802.15.4 표준의 PHY 및 MAC 계층을 바탕으로 설계된 저속 근거리 무선 네트워크를 위한 통신 프로토콜이다¹⁵⁾. ZigBee는 주로 저전력, 저속도, 긴 배터리 수명을 필요로 하는 어플리케이션에 사용된다. 또한 저렴한 가격으로 인해 무선 제어 및 모니터링 등의 목적으로 광범위한 영역에서 사용 중이다. ZigBee는 최초로 설계 시 전력망 통신을 염두에 두지 않았으나, 스마트 미터

및 스마트 가전기기를 위한 인터페이스에 쉽게 적용 가능하여 전력 분야에서도 널리 이용한다. ZigBee 노드는 코디네이터(Coordinator), 라우터(Router), 엔드 디바이스(End device)의 세 가지 역할을 할 수 있고 적용 환경에 따라서 스타 및 P2P(Peer-to-peer) 토폴로지로 네트워크를 구성하여 높은 신뢰성과 넓은 네트워크 공간을 제공할 수 있다.

그림 1과 같이, ZigBee의 토폴로지에는 스타, 트리, 메쉬의 세 가지 방식이 있다. 스타 토폴로지에서는 네트워크 내에 있는 다수의 엔드디바이스는 하나의 코디네이터에 연결된다. 그리고 엔드디바이스들은 오직 코

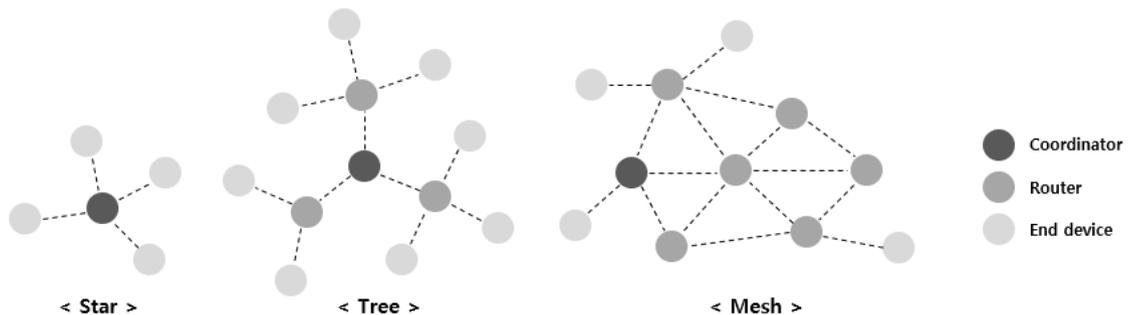


그림 1. ZigBee의 토폴로지 (스타, 트리, 메쉬)
 Fig. 1. Topology of ZigBee (Star, Tree, Mesh)

```

Algorithm 1. ZigBee Tree Topology - Parent selection

function Parent_selection;
parameters in neighbor table: PAN ID, Device Type, Link cost, Potential parent, Depth, RSSI
MinDepth: minimum depth, MaxRSSI: maximum RSSI

while PAN ID != NULL
  if Device Type is coordinator or router then
    if Link cost <= 3 and Potential parent == 1 then //Candidate of Parent node
      if Depth < MinDepth then
        MinDepth = Depth
        This node is selected with parent node.
      else if Depth == MinDepth then
        if RSSI > MaxRSSI then
          MaxRSSI = RSSI
          This node is selected with parent node.
        end if
      end if
    end if
  end if
  end if
  Searching the next PAN ID in neighbor table
end while
    
```

그림 2. ZigBee 트리 토폴로지에서의 부모 선택 알고리즘
 Fig. 2. Parent Selection algorithm for tree topology of ZigBee

디네이터와 통신할 수 있고 모든 통신 제어는 중심에 위치한 코디네이터가 담당한다. 스타 토폴로지는 설치가 용이하고 중앙의 노드가 모든 통신을 제어하기 때문에 유지보수 및 관리가 편하다. 또한 고장 발견이 쉽고, 각 노드마다 전송 속도를 다르게 설정할 수 있다. 그러나 중심부의 부하가 커져 노드들 사이의 충돌을 회피하는 방법에 대하여 고려해야하고, 사용자가 많아질수록 트래픽이 증가하여 통신 속도를 저하시킨다. 또한 중앙 노드에게 문제가 발생하면 토폴로지 전체가 통신되지 않는 치명적인 단점을 가진다. 트리 토폴로지의 경우 코디네이터로부터 시작하여 주변 라우터에게 가지, 엔드디바이스에게 잎사귀와 같은 나무 형태로 네트워크를 형성한다. 모든 연결에는 부모-자식 관계가 존재하고 계층적인 구조를 가진다. 트리 토폴로지는 부모 노드가 하위 모든 자식 노드들을 관리하기 때문에 통신망의 확장과 유지관리에 용이하다. 그러나 상위 부모에게 문제가 발생하면 하위 모든 자식 노드들이 통신하지 못하는 단점을 가진다. 이 때, 네트워크와 통신할 수 없게 된 모든 자식 노드들을 Orphan 노드라고 한다. 따라서 트리 토폴로지는 네트워크 확장과 관리에 유리하지만 노드들 간의 단단한 연결을 유지해야 하고 Orphan 노드가 발생 시 효과적인 처리 방법이 요구된다. 메쉬 토폴로지는 노드들이

서로 P2P로 연결되어 있는 그물형 네트워크 형태를 한다. 메쉬 토폴로지의 노드들은 인접한 노드와 연결되어 있기 때문에 회선에 장애가 발생하더라도 다른 경로를 이용할 수 있어서 데이터의 신뢰성이 높다. 그러나 동일한 목적지에 데이터를 전송하더라도 좋지 못한 경로를 통해 지나갈 수 있는 가능성이 있어서 복잡한 라우팅 알고리즘이 필요하다. 또한 네트워크의 장치들이 개별적으로 동작하여 총체적인 관리가 어렵다. 현대에는 Internet Service Provider(ISP)에 의한 통신 서비스 제공이나, 스마트 그리드 및 센서 네트워크 환경에서 장치들의 유지보수 및 관리가 네트워크에 필수적이기 때문에 스타와 트리 토폴로지를 주로 사용한다. 본 논문에서는 다수의 노드를 관리하기에 유용한 트리 토폴로지에 대해 자세히 살펴본다.

ZigBee에서 트리 네트워크를 구성할 때 다수의 부모-자식 관계가 형성된다. 부모-자식 관계 형성 시 고려하는 파라미터에는 PAN ID, 디바이스 역할, 연결 비용, 부모 가능성, 깊이가 있고, 최종적으로 RSSI를 비교한다. 자식이 될 노드는 이웃 테이블에서 RSSI가 가장 큰 노드를 부모 노드로 선택하고 연결과정을 수행한다. 그림 2는 ZigBee에서 트리 네트워크 형성 시 수행하는 부모-자식 선택 알고리즘을 보여준다¹⁶⁾. 자식 노드가 부모 노드를 선택할 때, PAN ID의 존재 유

무를 검사하여 네트워크를 가지고 있는 노드임을 파악하고 자식 노드를 수용할 수 있는 코디네이터 혹은 라우터인지 확인한다. 그 이후 부모 가능성을 확인하여 부모 능력이 있는 노드인지 판단하고 연결 비용이 3 이하인 노드를 부모 노드 후보자로 선택한다. 부모 노드 후보자들 중에서 깊이가 가장 작은 노드를 먼저 부모 노드로 선택하지만, 둘 이상의 후보자들이 깊이가 동일할 때는 높은 RSSI를 가진 노드를 최종 부모 노드로 선택한다.

ZigBee의 트리 토폴로지에서는 구현된 부모 선택 알고리즘에 따라 네트워크를 형성한다. 하지만 이 방식은 네트워크 형성 시 그림 3과 같은 비효율적인 문제를 동반한다. 첫 번째로 잡음과 간섭이 적은 환경에서 RSSI는 거리에 따라 변화하기 때문에 RSSI가 큰 노드를 선택한다는 것은 가까운 거리에 있는 노드를 선택한다는 의미와 같다. 이것은 작고 밀집된 네트워크를 형성한다. 두 번째는 선착순으로 부모-자식 관계를 형성하는 연결 문제가 발생한다. 네트워크의 모든 노드들은 현실적으로 동시에 전원이 켜질 수 없고 부모 노드는 자식 노드를 선택할 능력이 없기 때문에 먼저 네트워크 참여 요청을 보낸 노드가 부모 노드의 자식이 된다. 만약 먼저 요청을 보내는 노드들이 서로 멀거있을 경우 전체 네트워크는 더욱 작아진다. 마지막으로 과도한 RSSI 평가를 통해 작은 네트워크를 형성한다. Seungku Kim^[17] 등의 연구에 따르면, 외부 잡음이나 간섭이 없을 때 RSSI와 PRR은 비례관계에 있다. 하지만 RSSI가 특정한 값 이상이 되면 PRR은 100%로 포화상태가 된다. 포화 구간에서는 RSSI가 상승하여도 PRR은 항상 100%이기 때문에 RSSI가 큰 노드를 선택하는 일은 동일한 신뢰성 아래에 더욱 작은 네트워크를 형성할 뿐이다.

응용 요구사항에 따라 무선 네트워크 토폴로지 구성에 대한 연구가 많이 수행되었다. R. Ramanathan^[18] 등은 최소 스페닝 트리 알고리즘과 유사한 방법을 사용하여 각 링크를 거리와 스텝으로 표시하고 링크별 송신 파워를 다르게 설정하여 네트워크를 구성한다. R. Wattenhofer^[19] 등은 노드 간의 연결이 이루어질 때 송신 파워를 최소에서 최대로 변화하며 통신하면서 적정 송신 파워를 찾아 설정하여 네트워크를 구성한다. Li Li^[20] 등은 송신기와 수신기 사이에 발생하는 콘의 각도를 조절하며 네트워크의 링크 수를 최소화한다. 이 논문들과 같이 대부분의 토폴로지 구성 방식들은 최소한의 링크 수, 연결 신뢰성, 전력 소모 최소화에 중점을 두고 네트워크 확장성에 관하여 고려하지 않았다. 네트워크의 확장성과 관련된 논문들 중에서, Hakki Bagci^[21] 등은 분산된 네트워크를 형성하기 위해 경로 비용을 이용한다. 이 연구에서의 경로 비용은 코디네이터까지의 경로 중에서 가장 긴 경로의 길이를 의미한다. 센서 노드들이 네트워크에 연결될 때 먼 거리의 경로를 선택하기 때문에 대체적으로 넓은 네트워크를 형성할 수 있지만 링크의 방향과 신뢰성을 고려하지 않았기 때문에 임의로 배치된 센서 노드들에 대해서 예외의 경우가 빈번하게 발생한다. Taehong Kim^[22] 등은 네트워크 확장을 위해 ZTC(ZigBee Tree Construction)을 제안하여 기존의 ZigBee 트리 토폴로지와 비교하였다. ZTC는 링크의 방향과 LQI(Link Quality Indicator)를 통한 연결 신뢰성을 고려하여 다방향으로 확장된 트리 네트워크를 형성하였다. 그러나 부모-자식 관계 형성 시, 부모 노드가 송신한 네트워크 초대 요청을 먼저 응답한 노드가 자식 노드로 선택되기 때문에 선착순 문제가 발생한다. 또한 노드들 간의 거리를 고려하지 않기 때문에

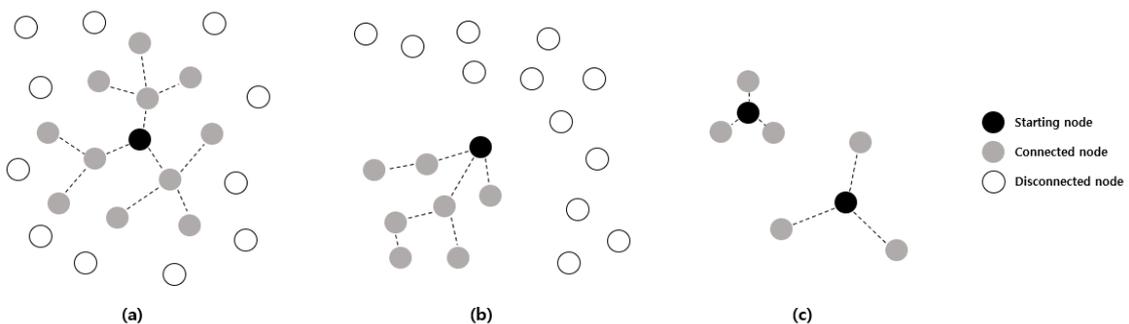


그림 3. ZigBee 트리 토폴로지의 문제점. (a)큰 RSSI 선택으로 인한 네트워크 최소화, (b)선착순 연결 문제, (c)동일한 PRR을 가진 두 네트워크의 크기 차이 발생
 Fig. 3. Problem of ZigBee tree topology. (a)Network minimization due to larger RSSI selection, (b)Links of first come first served, (c)Size difference between two networks with the same PRR

가까운 노드가 자식 노드로 선택되면 네트워크 확장성을 저하시킬 수 있다. 이와 달리 본 논문은 광범위한 마이크로그리드 환경에 적용하기 위해 링크의 방향, 신뢰성, 노드 간의 거리를 고려하여 네트워크의 확장에 유리한 토폴로지 구성 알고리즘을 제안한다.

IV. ZigBee 트리 기반 확장 토폴로지 구성 알고리즘

본 논문은 다양한 마이크로그리드 환경에서 네트워크 확장성을 향상시키기 위해 ZigBee 트리 기반의 Scalable Tree Organization(STO) 알고리즘을 제안한다. STO는 기존의 ZigBee의 토폴로지 형성보다 네트워크 과정이 단순하고 확장형 트리 구조를 형성하기 때문에 더욱 넓은 구역에 있는 많은 노드들을 네트워크에 수용할 수 있다. STO 알고리즘을 적용한 ZigBee 네트워크 형성 과정은 그림 4와 같다. STO 알고리즘은 기존의 ZigBee 트리를 기반으로 Network Discovery Request, Network Discovery Response, Joining Complete의 세 가지 절차를 통해 네트워크에 시드 노드를 형성한다. STO 알고리즘으로 시드 노드 생성을 마친 후에는 시드 노드를 활용하여 네트워크 형성을 완료한다.

4.1 STO 알고리즘을 적용한 ZigBee 네트워크 형성 과정

4.1.1 Network Discovery Request

ZigBee 방식과 동일하게 네트워크에 소속되지 않은 노드들은 모두 일정 주기마다 Network Discovery Request를 브로드캐스트한다. 이는 주변 이웃 노드들

중에서 네트워크에 소속된 노드에게 네트워크 연결을 희망한다고 알려주는 역할을 한다. 기존의 ZigBee에서는 자식 노드가 부모 노드를 선택하는 방식을 사용하여 Network Discovery Request를 전송한 이후에 다수의 부모 노드로부터 응답을 받기 위해 일정 시간 동안 수신 상태가 되었지만, STO 알고리즘은 부모 노드가 자식 노드를 선택하는 방식을 사용하기 때문에 Network Discovery Request를 전송한 노드는 단일 응답을 기다린다. Network Discovery Request는 부모 노드의 이웃 테이블에 기록될 유용한 정보들을 포함한다. 부모 노드가 자식 노드를 선택하여 응답을 해주기 위해서는 자식 노드의 요청 패킷 내에 디바이스의 정보가 있어야 한다.

4.1.2 Network Discovery Response

처음 Network Discovery Request를 수신한 부모 노드는 일정 시간동안 수신 상태를 유지하며 주변 이웃 노드들로부터 받은 요청들에 포함되어있는 정보들과 각 노드에 대한 RSSI를 함께 이웃 테이블에 저장한다. 수신 상태가 종료되는 시점에서, 부모 노드는 이웃 테이블에 저장된 주변 노드들의 정보를 기반으로 자식 노드로 적합한 노드를 부모 노드가 선택하여 Network Discovery Response를 전송한다. ZigBee는 부모-자식 관계를 형성할 때 PAN ID, 디바이스 역할, 연결 비용, 부모 기능성, 깊이와 같은 엄격한 고려 사항들이 존재했지만, STO 알고리즘은 오직 RSSI를 고려한다. 그림 5와 같이 주변 모든 이웃 노드들 중에서 PRR이 약 100% 정도 되는 -88dBm 이상의 RSSI를 갖는 노드가 자식 노드의 후보가 될 수 있다. 그리고 이 후보들 중에서 RSSI가 가장 낮은 노드를 먼저 자식 노드로 선택한다. 여기서 자식으로 선택된 노드를

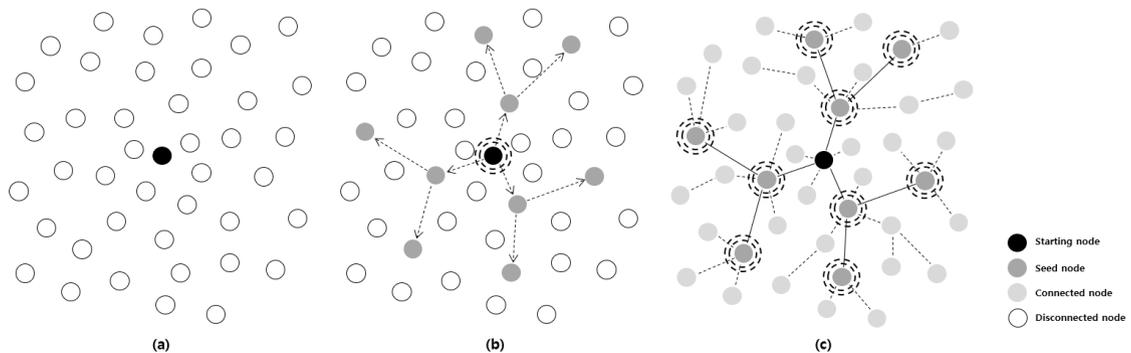


그림 4. STO 알고리즘을 적용한 ZigBee 네트워크 형성 과정. (a)초기 네트워크, (b)STO 알고리즘을 사용하여 시드 노드 생성, (c)시드 노드를 이용하여 네트워크 형성 완료
Fig. 4. ZigBee network formation process applying STO algorithm. (a)Initial network, (b)Generate seed nodes using STO algorithm, (c)Complete network formation using the seed nodes

시드 노드라고 한다. 자식 선택을 완료하면 부모 노드는 선택한 자식 노드에게 Network Discovery Response를 전송한다. 이 응답은 자식 노드가 네트워크에서 사용할 네트워크 주소 정보를 포함한다. 부모 노드가 Network Discovery Response를 보낼 때, 자식으로 선택된 노드뿐만 아니라 주변의 모든 노드들이 응답을 수신한다. 응답을 수신한 주변의 노드들은 응답 내에 있는 선택된 노드의 노드 번호를 저장한다. 이 정보는 추후에 시드 노드 확장에 사용된다.

4.1.3 Joining Complete

자식 노드로 선택되어 Network Discovery

Response를 수신한 노드는 응답 메시지 내에 포함되어 있는 네트워크 주소를 자신의 주소로 설정하고 자신의 깊이를 부모 노드의 깊이보다 한 단계 깊도록 설정하여 네트워크에 참여한 후 부모 노드에게 최종적으로 Joining Complete 메시지를 전송한다. 이 때 Joining Complete 메시지는 부모 노드를 포함한 주변 모든 이웃 노드들이 수신한다. 이웃 노드들 중에서 이전에 부모 노드로부터 Network Discovery Response를 통해 노드 번호를 저장했었던 노드들은 자식 가능성 파라미터를 0으로 설정하여 더 이상 부모 노드로부터 자식으로 선택될 수 없는 노드가 된다. 이 노드

표 2. STO의 Network Discovery Request에 포함된 파라미터들
Table 2. Parameters included in the Network Discovery Request of STO

Parameter	Range	Description
Node number	0x0000~0xffff	Node sequence number
Device Type	0x00~0x02	0: Coordinator 1: Router 2: End device
Depth	0x00~0x0f	The tree depth of the neighbor device
Potential Child	0x00~0x01	0: this device is not a potential child 1: this device is a potential child
Potential Parent	0x00~0x01	0: this device is not a potential parent 1: this device is a potential parent
Association	0x00~0x01	0: this device is associated in network 1: this device is not associated in network
MaxChild	0x00~0xff	Number of maximum children each node
MaxDepth	0x00~0xff	Limited maximum depth of tree

```

Algorithm 2. Scalable Topology Organization - Child selection (Generate of seed node)
function Child_selection;
parameters in neighbor table: Node number, Potential child, Association, RSSI
MinRSSI: minimum RSSI

while Node number != 0
  if Potential child == 1 and Association == 0 then
    if RSSI >= -88dBm then //Threshold RSSI of PRR 100%
      if RSSI < MinRSSI then
        MinRSSI = RSSI
        This node is selected with child node.
      end if
    end if
  end if
  end if
  Searching the next Node number of neighbor table
end while
    
```

그림 5. STO 자식 선택 알고리즘
Fig. 5. Scalable Topology Organization child selection algorithm

들은 부모 노드와 자식 노드의 통신 교집합 범위에 있는 노드들로, 다음 주기에 Network Discovery Request를 전송할 때 부모 노드에게 자식 가능성이 없음을 알려준다. 자식 노드로부터 Joining Complete 메시지를 받은 부모 노드는 이웃 테이블에서 자식 노드를 자식 후보 리스트에서 제외하고 부모-자식 관계의 연결을 마친다. 부모 노드가 다음 자식을 선택할 때는 자신의 이웃 테이블에서 자식 가능성이 없는 이웃 노드들을 제외하고 나머지 노드들 중에서 자식 노드 후보를 선출하여 위 과정을 반복한다.

STO 알고리즘은 부모 노드의 통신 범위를 P , n 번째 선택된 자식 노드 N_n 의 통신 범위를 C_n 라고 했을 때, N_1 선택 시 $P \cap C_1$ 에 위치한 모든 노드들은 이후의 자식 노드 후보에서 제외된다. N_2 는 $P - (P \cap C_1)$ 에 위치한 노드들 중에서 가장 먼 거리에 있는 노드로 선택된다. 즉 N_1 과 N_2 는 통신할 수 없는 거리에 위치한다. 다음으로 N_3 는 $P - ((P \cap C_1) + (P \cap C_2))$ 에 위치한 노드들은 중에서 가장 먼 거리에 있는 노드로 선택되고 N_1 , N_2 와 통신할 수 없는 거리에 위치한다. 동일한 방법으로 자식 노드를 더 이상 선택할 수 없을 때 까지 부모-자식 관계를 형성한다. 모든 N_n 들은 P 내에 존재하지만 서로 통신할 수 없을 만큼 떨어져있기 때문에 부모 노드를 중심으로 다방향에 위치한다. 이는 네트워크가 넓은 범위로 형성될 수 있도록 돕는다.

4.2 시드 노드를 이용한 네트워크 형성 완료

STO 알고리즘을 적용한 네트워크 형성은 위의 절차를 반복하여 트리의 시드 노드를 확장한다. 시드 노드 확장은 다음의 두 조건에 의하여 중단된다.

- 네트워크에서 MaxDepth-1인 깊이를 가진 부모 노드들
- STO 연결에서 더 이상의 자식 후보 노드가 존재하지 않는 부모 노드들

첫 번째 조건은 MaxDepth에 연결된 노드들이 더 이상의 자식 노드를 가질 수 없으므로 MaxDepth-1의 깊이를 가진 부모 노드들은 자식 노드를 선택할 때 더 이상의 시드 노드 확장이 필요하지 않기 때문에 네트워크의 시드 노드 확장을 멈추게 하는 조건이다. 두 번째 조건은 시드 노드 확장 과정에서 자식 가능성 파라미터가 0이 되어 더 이상 자식 노드로 선택될 수 없

었던 노드들 또한 최종적으로 네트워크에 연결되어야 하기 때문에 네트워크 범위 내에 남아있는 노드들이 모두 연결될 수 있도록 하는 조건이다. 두 조건 중에서 하나라도 만족한다면 네트워크의 시드 노드 확장을 종료하고 생성한 시드 노드를 이용하여 나머지 네트워크 형성 과정을 수행한다. 이 과정은 시드 노드 확장을 위해 자식을 선택하는 것이 아니라 기존의 ZigBee 방식과 동일하게 높은 RSSI를 가진 노드를 먼저 자식 노드로 선택한다.

STO 알고리즘을 사용하면 확장된 네트워크를 형성할 수 있다. 토폴로지 구성 초반에는 낮은 RSSI를 가진 시드 노드 선정을 통하여 넓은 범위로 확장할 수 있다. 후반에는 시드 노드를 이용하여 남겨진 노드들과의 연결을 수행하여 미연결 노드 혹은 토폴로지 말단에 있는 노드들을 네트워크에 포함할 수 있다.

V. 성능 평가

본 논문에서는 기존의 ZigBee와 제한한 STO 알고리즘을 마이크로그리드 환경에 적용하여 비교 분석하기 위해 OMNeT++^[23] 시뮬레이터를 사용하였다. OMNeT++를 통해 실제 마이크로그리드와 유사한 환경에서 ZigBee 트리 토폴로지, ZTC, STO 알고리즘

표 3. OMNeT++의 시뮬레이션 네트워크 설정
Table 3. Network Simulation Configuration of OMNeT++

Parameters	Configuration
Communication Protocol	ZigBee standard
Topology	ZigBee Tree Topology, ZTC, STO
Mobility	Stationary
Devices starting interval	10 ms
Network Discovery Request sending interval	4 s
Network Permit Duration time	2 s
Simulation running time	1~2 min
Components	1 Coordinator, 199 Routers
RSSI range	-100~0 dBm
Sensitivity	-100 dBm
Tx power	0.5 mW
Channel	2.45 GHz
Bandwidth	2.8 MHz
Data rate	250 kbps
Maximum Child	3~4
Maximum Depth	1~4

을 사용한 네트워크를 시뮬레이션 하였다. OMNeT++의 네트워크 기본 설정에 대한 정보는 표 3과 같다. 세 방식 모두 ZigBee를 기반으로 구현하였고, 노드들의 이동성은 없다. 노드는 총 200개이고 10ms 간격마다 하나씩 전원이 켜진다. 노드들 중에서 네트워크에 소속되지 않은 노드들은 전원이 들어옴과 동시에 4초 주기마다 Network Discovery Request를 전송한다. 기존 ZigBee의 자식 노드 혹은 STO의 부모 노드의 수신 대기 시간은 2초이고, 시뮬레이션의 총 러닝타임은 1~2분 사이이다. 각 노드의 송신 파워는 0.5mW이고 2.45GHz의 채널을 사용하여 250kbps의 속도로 통신한다. MaxChild는 하나의 부모 노드가 연결할 수 있는 최대 자식의 수이고 MaxDepth는 네트워크가 가질

수 있는 최대 깊이의 의미로 각각 3~4, 1~4의 값으로 변화하며 시뮬레이션을 진행하였다.

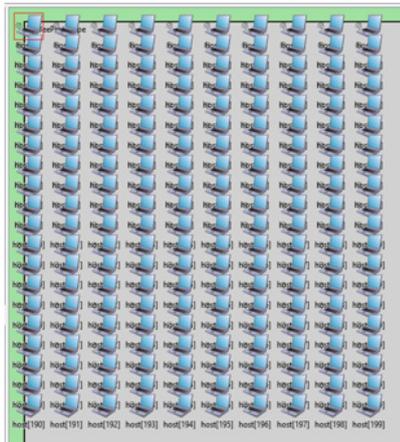
5.1 시뮬레이션 환경

2장에서 분석한 마이크로그리드 환경들을 기반으로 기존 ZigBee, ZTC, STO 알고리즘을 적용한 ZigBee 네트워크를 시뮬레이션 하였다. 다양한 마이크로그리드 환경 중에서도 규모가 작은 풍력 분산 발전기 내부, 홈 마이크로그리드 환경에서는 좁은 공간에 소량의 센서들을 배치하기 때문에 두 토폴로지 방식의 차이를 알 수 없다. 따라서 규모가 큰 태양광 분산 발전과 캠퍼스·빌딩 마이크로그리드 환경에서 STO 알고리즘을 적용한 네트워크를 구축하여 기존의 ZigBee 트리 토폴로지 및 ZTC와 비교하였다.

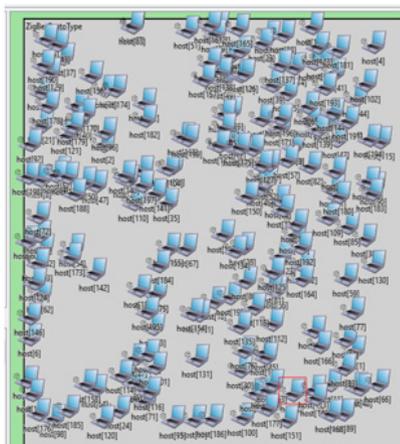
그림 6과 같이, 시뮬레이션은 100m*100m의 네트워크 공간에서 200개의 센서를 배치하여 진행한다. 또한 각각의 마이크로그리드 환경에 따라 센서를 다른 구조로 배치하였다. 실제로 태양광 분산 발전 환경에서는 PV 어레이가 일렬로 나란히 나열되어 있으므로 그리드형 구조로 센서를 배치하였고, 캠퍼스 및 빌딩 환경에서는 사용자의 필요에 따라 임의의 위치에 전자 기기가 배치되므로 랜덤형 구조로 센서를 배치하였다. 그리고 MaxChild와 MaxDepth 파라미터의 값을 변화하며 각 토폴로지 방식의 노드 수와 모든 링크들의 평균 RSSI를 측정하였다.

5.2 시뮬레이션 결과

태양광 분산 발전 마이크로그리드 환경에서의 그리드형 네트워크 시뮬레이션 결과는 그림 7과 같다. 그림 7(a)에서 MaxDepth가 1부터 3까지 구간의 네트워크 노드 수는 ZigBee와 STO 방식 둘 다 동일하게 모든 노드들을 네트워크 토폴로지 내에 포함시켰다. 그러나 MaxDepth가 4인 지점부터 ZigBee와 STO를 이용하여 네트워크를 형성했을 때 노드 수의 차이를 보인다. MaxChild가 3일 때, ZigBee는 연결 가능한 121개의 노드 중에서 95%의 노드를 네트워크에 포함한 반면 STO는 100%의 노드를 네트워크에 포함하였다. MaxChild가 4일 때, 연결 가능한 200개의 노드 중에서 ZigBee는 89%, STO는 100%의 노드를 네트워크에 포함하였다. 실험 결과의 차이는 STO의 시드 노드 생성으로 인하여 발생한다. 기존 ZigBee는 단순히 높은 RSSI를 가진 링크를 선택하며 네트워크를 형성하지만, STO는 낮은 RSSI를 가진 시드 노드를 생성하여 네트워크를 확장하고 시드 노드를 기반으로 주변 네트워크를 구성하기 때문에 비교적 많은 노드를 네



(a)



(b)

그림 6. 시뮬레이션에서 마이크로그리드 환경에 따른 센서 분포 (a)그리드형, (b)랜덤형
Fig. 6. Sensors distribution according to Microgrid environment in simulation (a)Grid, (b)Random

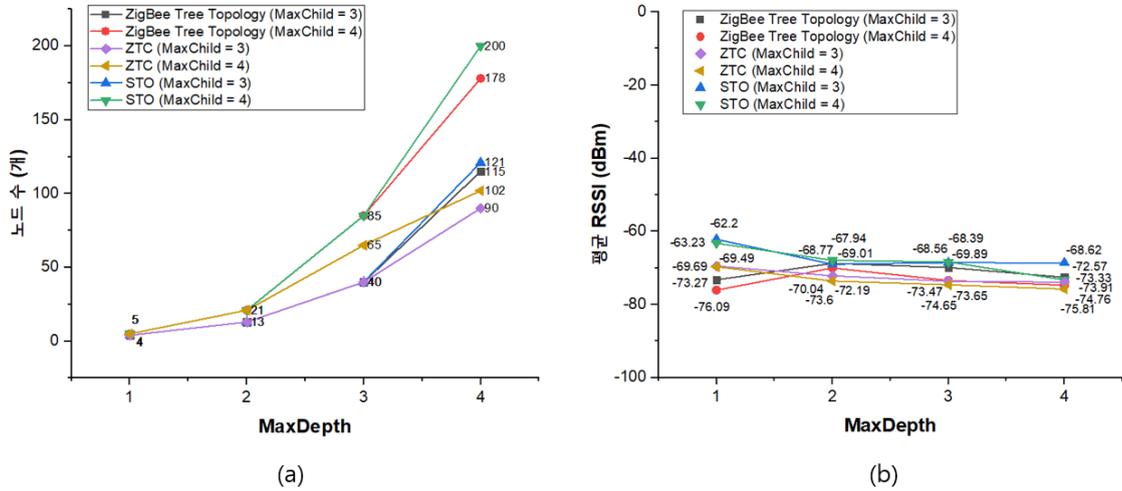


그림 7. 그리드형 네트워크에서 ZigBee 트리 토폴로지, ZTC, STO의 시뮬레이션 결과 그래프 (a)MaxDepth 대 네트워크 노드 수 그래프, (b)MaxDepth 대 링크들의 평균 RSSI 그래프
 Fig. 7. ZigBee tree topology, ZTC and STO simulation results graph in grid type network. (a)MaxDepth vs. Number of node in network, (b)MaxDepth vs. Average RSSI of links

트위크에 포함시킬 수 있다. 네트워크의 면적과 노드 수, MaxDepth가 증가함에 따라 네트워크에 포함된 노드 수의 차이는 지수적으로 증가할 것이다. ZTC는 MaxDepth가 3 혹은 4일 때 ZigBee 트리 토폴로지와 STO보다 적은 노드를 네트워크에 포함시켰다. MaxChild가 4일 때 전체 연결 가능한 노드 중에서 76%, 51%의 노드와 네트워크를 형성하였다. ZTC는 부모 노드가 주변 이웃 노드들을 자식 노드로 선택할 때, 랜덤 지연시간에 의존하여 먼저 응답한 노드를 자식 노드로 선정하기 때문에 가까운 노드들이 네트워크 초대 요청에 먼저 응답하는 경우 넓은 범위에 분산된 노드들을 모두 네트워크에 포함시킬 수 없다. 따라서 STO를 이용하여 네트워크를 형성하는 것이 그리드형 마이크로그리드 네트워크의 확장에 용이하다.

그림7(b)는 MaxDepth에 따른 네트워크 링크들의 평균 RSSI에 대한 실험 결과이다. MaxDepth가 1일 때의 평균 RSSI는 ZigBee가 -73dBm, -76dBm의 값을, ZTC가 -69dBm, -69dBm의 값을, STO 알고리즘을 이용한 네트워크가 -62dBm, -63dBm의 값을 보인다. STO 방식이 ZigBee보다 최대 13dBm 더 높은 RSSI를 갖는 이유는 MaxDepth가 1일 때 코디네이터가 시드 노드 역할을 수행하기 때문이다. 시드 노드는 자신의 깊이가 MaxDepth-1인 지점에서 시드 노드 생성을 종료하고 주변 남아있는 노드들 중에서 RSSI가 높게 수신되는 노드를 자식 노드로 네트워크에 포함시킨다. 코디네이터(루트)의 깊이는 0이고 MaxDepth

가 1이기 때문에 코디네이터는 시드 노드의 기능을 수행하여 RSSI가 가장 큰 주변 노드들과 네트워크를 형성하여 전체 링크의 평균 RSSI가 상대적으로 큰 값이 측정되었다. 반면 기존의 ZigBee는 네트워크를 구성할 때 자식 노드들의 선착순 문제가 발생하고 연결 비용이 3 이상인 노드를 선택해야 하는 엄격한 조건이 존재하기 때문에 STO보다 낮은 평균 -74.7dBm의 RSSI를 보인다. MaxDepth가 2부터 4까지는 토폴로지 방식 모두 비슷한 평균 RSSI를 가진다. ZTC는 네트워크를 형성할 때 임의의 노드가 자식 노드로 연결되기 때문에 일정한 RSSI 값을 가지지 않고 매번 연결할 때마다 다른 평균 RSSI를 가진다. STO는 MaxDepth가 증가함에 따라 시드 노드의 생성량이 증가한다. STO는 시드 노드를 생성할 때 낮은 RSSI를 가진 노드를 시드 노드로 선택하기 때문에 MaxDepth가 증가하면서 평균 RSSI가 감소한다. 하지만 시드 노드의 수가 증가함에 따라 시드 노드를 기반으로 연결되는 주변 노드들의 수도 지수적으로 증가하기 때문에 MaxDepth가 증가할수록 평균 RSSI가 점점 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 기존 ZigBee와 ZTC는 여전히 선착순 문제의 영향으로 평균 RSSI가 변동하는 값을 가진다. 세 방식 모두 네트워크의 범위가 넓어지고 노드의 수가 증가함에 따라 더욱 일정하고 유사한 평균 RSSI를 가진다. 또한 외부 간섭이 없는 환경에서 세 방식 모두 100%의 PRR을 유지하고 있다. 따라서 STO 방식은 기존의 ZigBee, ZTC

와 유사한 링크의 신뢰성을 제공하고 더 넓은 범위의 그리드형 네트워크 형성을 할 수 있다.

캡퍼스 및 빌딩 마이크로그리드 환경에서의 랜덤형 네트워크 시뮬레이션 결과는 그림 8과 같다. 그림 8(a)에서도 MaxDepth가 1부터 3까지의 네트워크 노드 수는 ZigBee와 STO를 이용하여 네트워크를 형성했을 때 모두 100%의 노드를 네트워크에 포함시켰고 ZTC는 MaxDepth가 3이고 MaxChild가 4일 때 79%의 노드를 네트워크에 포함시켰다. MaxDepth가 4이고 MaxChild의 값이 3 또는 4일 때, ZigBee는 각각 84%, 87%, ZTC는 80%, 62%, STO 방식은 각각 98%, 100%의 노드와 네트워크 연결을 이뤘다. 이 실험에서 STO는 기존 ZigBee보다 평균 13.5%, ZTC보다 평균 28% 더 많은 양의 노드를 네트워크에 포함하였다. 이는 STO가 고정적인 넓은 범위로 시드 노드를 생성하고 이를 기반으로 주변 노드들을 네트워크에 포함시키기 때문에 기존의 ZigBee와 ZTC보다 확장된 네트워크를 형성할 수 있기 때문이다. 따라서 기존의 ZigBee와 ZTC보다 STO를 이용하여 네트워크를 형성하는 것이 랜덤형 마이크로그리드 네트워크의 확장에 용이하다.

그림 8(b)의 그래프는 그리드형 네트워크와 동일한 양상을 보인다. MaxDepth가 1일 때, STO를 이용하여 형성한 네트워크가 기존 ZigBee보다 약 20dBm 더 높은 평균 RSSI를 보인다. 이는 네트워크 형성을 시작하는 코디네이터가 0의 깊이를 가지기 때문에 시드

노드 생성을 하지 않고 자신이 시드 노드의 역할을 수행하여 높은 RSSI를 가진 주변 노드들을 자식 노드로 선택하기 때문이다. MaxDepth가 점점 증가할수록 평균 RSSI는 감소하는데, 그 이유는 MaxDepth가 증가함에 따라 더욱 많은 시드 노드를 생성하기 때문이다. STO 방식에서 시드 노드를 생성할 때 낮은 RSSI를 가진 노드들을 선택하기 때문에 링크들의 평균 RSSI는 감소된다. MaxDepth가 증가하면 시드 노드의 수가 증가하지만, 시드 노드를 기반으로 연결되는 주변 노드들의 수도 증가하기 때문에 높은 RSSI를 가진 다수의 노드가 네트워크에 포함된다. 따라서 STO의 평균 RSSI는 감소하다가 점점 일정한 그래프를 보인다. ZigBee는 MaxDepth가 증가하여도 엄격한 조건들을 모두 만족하고, 높은 RSSI를 가진 노드를 부모 노드로 선택하는 경우의 수가 적기 때문에 평균 RSSI가 균일하게 증가하지 않는다. ZTC는 임의의 이웃 노드와 부모-자식 관계를 형성하기 때문에 평균 RSSI가 매번 연결할 때마다 변동한다. 세 방식 모두 -88dBm 이상의 평균 RSSI를 갖기 때문에 동일한 PRR을 가진다. 따라서 STO 방식과 ZigBee, ZTC는 유사한 신뢰성을 가진 랜덤형 네트워크를 형성한다.

두 마이크로그리드 환경에서의 실험 결과를 통해, STO 알고리즘은 ZigBee, ZTC를 이용하여 네트워크를 형성할 때 보다 넓은 범위의 많은 노드들을 포함할 수 있고 안정적인 네트워크에서 신뢰성을 보장할 수 있다. 또한 그리드형 마이크로그리드 환경보다 랜덤형

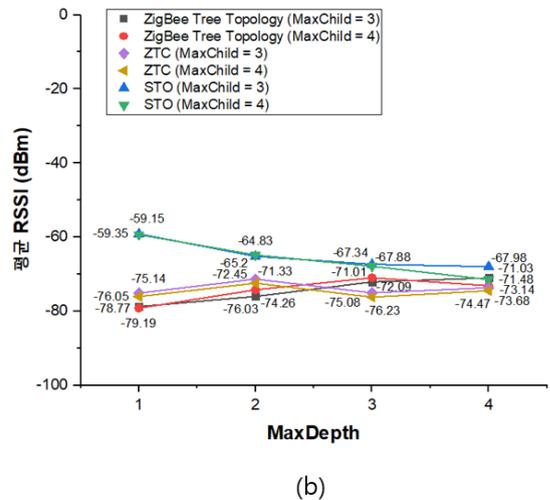
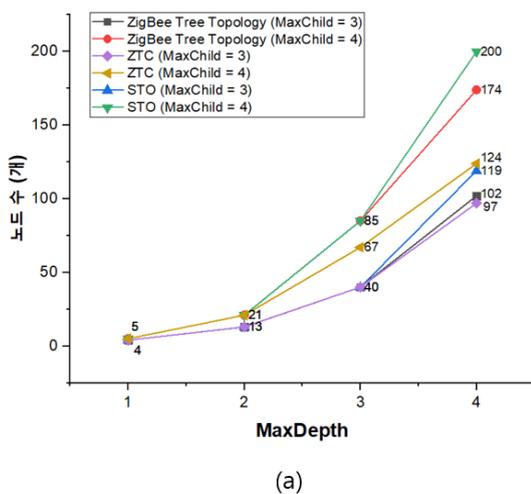


그림 8. 랜덤형 네트워크에서 ZigBee 트리 토폴로지, ZTC, STO의 시뮬레이션 결과 그래프 (a)MaxDepth 대 네트워크 노드 수 그래프, (b)MaxDepth 대 링크들의 평균 RSSI 그래프
 Fig. 8. ZigBee tree topology, ZTC and STO simulation results graph in random type network. (a)MaxDepth vs. Number of node in network, (b)MaxDepth vs. Average RSSI of links

마이크로그리드 환경에서 STO와 ZigBee의 실험 결과 확연한 차이를 보이기 때문에 STO는 복잡한 마이크로그리드 환경에서 보다 우수한 성능을 나타낼 것으로 기대된다.

VI. 결 론

본 논문은 ZigBee 트리를 기반으로 마이크로그리드 환경에서 네트워크 확장성이 용이한 토폴로지 구성 알고리즘을 제안하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 그리드형, 랜덤형 마이크로그리드 환경에서 기존의 ZigBee 보다 넓은 네트워크를 형성하고 많은 수의 노드를 네트워크에 포함시킬 수 있음을 증명하였다. 기존의 ZigBee는 네트워크 형성 과정에서 RSSI가 높은 노드들을 선택하여 네트워크를 구성하기 때문에 대체적으로 좁은 규모의 네트워크를 형성한다. 그리고 선착순 문제로 인해 자식 노드가 네트워크 요청을 보내는 순서대로 네트워크에 연결된다. 또한 불필요하게 높은 RSSI를 가진 노드를 부모 노드로 선택함으로써 네트워크 확장 범위에 대해 고려하지 않았다. 반면 우리가 제안한 STO 알고리즘은 네트워크 시드 노드 확장을 통해 넓은 범위의 네트워크에 있는 많은 수의 노드들과 네트워크를 형성할 수 있다. STO 알고리즘은 네트워크 형성 시 PRR이 100%에 가까운 RSSI를 가진 노드들 중에서 가장 RSSI가 작은 노드를 선택하여 링크의 연결 보장성과 네트워크의 확장 범위를 동시에 고려하였다. 태양광 분산 발전 설비와 캠퍼스 및 빌딩 마이크로그리드 환경에서 기존 ZigBee와 STO 알고리즘을 적용한 ZigBee 네트워크를 비교 분석하였는데, 네트워크 링크들의 PRR은 서로 비슷한 수준을 보였으나, 두 마이크로그리드 환경에서 STO 알고리즘을 적용했을 때가 기존의 ZigBee 보다 약 11~14% 더 높은 노드 수용력을 보였다. 미래에는 마이크로그리드가 확산되면서 관리 면적과 분산 전원의 수가 증가하고 네트워크가 복잡해짐에 따라 STO 알고리즘이 더욱 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

References

[1] M. Lee and S. Kim, "Analysis of smart grid technologies and domestic and foreign policy trends," *J. KIIT*, vol. 11, No. 8, pp. 181-187, Aug. 2013.

[2] M. N. Ambia, A. Al-Durra, and S. M. Mueeen, "Centralized power control strategy

for AC-DC hybrid micro-grid system using multi-converter scheme," *37th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, Melbourne, VIC, Australia, Nov. 2011.

[3] Y. Li, D. M. Vilathgamuwa, and P. C. Loh, "Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1195-1204, Sep. 2004.

[4] S. Elyengui, R. Bouhouchi, and T. Ezzedine, "The enhancement of communication technologies and networks for smart grid applications," *IJETTCS*, vol. 2, no. 6, pp. 107-115, Nov.-Dec. 2013.

[5] H. Lee, H. Ann, and S. Kim, "An analysis on suitability of 6LoWPAN based smartgrid environment construction," *Inf. Process. Res. Council for Energy Grid (IPEG)*, pp. 132-135, Daejeon, Korea, Nov. 2017.

[6] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 18-28, Jan.-Feb. 2010.

[7] H. Liang, B. J. Choi, W. Zhuang, X. Shen, A. S. A. Awad, and A. Abdr, "Multiagent coordination in microgrids via wireless networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 19, no. 3, pp. 14-22, Jun. 2012.

[8] J. Han, C. Choi, and I. Lee, "More efficient home energy management system based on ZigBee communication and infrared remote controls," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 57, no. 1, pp. 85-89, Feb. 2011.

[9] M. A. Setiawan, F. Shahnia, S. Rajakaruna, and A. Ghosh, "ZigBee-based communication system for data transfer within future microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2343-2355, Sep. 2015.

[10] M. A. Setiawan, F. Shahnia, A. Ghosh, and S. Rajakaruna, "Developing the ZigBee based data payload coding for data communication in microgrids," *Power Eng. Conf. (AUPEC)*, Perth, WA, Australia, Oct. 2014.

[11] G. Stanculescu, H. Farhangi, A. Palizban, and N. Stanchev, "Communication technologies for BCIT smart microgrid," *Innovative Smart Grid*

- Technol.(ISGT)*, Washington, DC, USA, Jan. 2012.
- [12] P. Yi, A. Iwayemi, and C. Zhou, "Developing ZigBee deployment guideline under WiFi interference for smart grid applications," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 110-120, Mar. 2011.
- [13] Y. Chen, Y. Wu, C. Song, and Y. Chen, "Design and implementation of energy management system with fuzzy control for dc microgrid systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1563-1570, Apr. 2013.
- [14] T. C. F. Norman, J. Y. C. Chan, W. Lau, J. T. Y. Poon, and L. L. Lai, "Real-time power-quality monitoring with hybrid sinusoidal and lifting wavelet compression algorithm," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 1718-1726, Oct. 2012.
- [15] S. Farahani, *ZigBee wireless networks and transceivers*, Newnes, pp. 1-364, 2008.
- [16] ZigBee Alliance, *ZigBee specification*, ZigBee Standards Organization, pp. 1-622, 2012.
- [17] S. Kim, S. Kim, and D. Eom, "RSSI, LQI-based transmission power control for body area networks in healthcare environment," *IEEE J. Biomedical and Health Informatics*, vol. 17, no. 3, pp. 561-571, May 2013.
- [18] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain, "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment," *IEEE INFOCOM 2000*, pp. 404-413, Tel Aviv, Israel, Mar. 2000.
- [19] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, and Y.-M. Wang, "Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks," *IEEE INFOCOM*, Anchorage, AK, USA, Apr. 2001.
- [20] L. Li, J. Y. Halpern, P. Bahl, Y. M. Wang, and R. Wattenhofer, "Analysis of a cone-based Distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks," *PODC 2001*, pp. 264-273, Newport, Rhode Island, USA, Aug. 2001.
- [21] H. Bagci, I. Korpeoglu, and A. Yazici, "A distributed fault-tolerant topology control algorithm for heterogeneous wireless sensor networks," *IEEE Trans. Parallel and Distrib. Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 914-923, Apr. 2015.
- [22] T. Kim, S. H. Kim, and D. Kim, "Distributed topology construction in ZigBee wireless networks," *Wireless Pers. Commun.*, pp. 1-15, Jul. 2018.
- [23] A. Varga and R. Hornig, "An overview of the OMNeT++ simulation environment," *Simutools 2008*, Marseille, France, Mar. 2008.

이 현 국 (Heonguk Lee)



2017년 2월 : 청주대학교 반도체공학과 학사
 2017년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 무선센서네트워크, 이종통신기술, 실내위치인식, 토폴로지 제어

김 승 구 (Seungku Kim)



2007년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학부 공학사
 2010년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학부 공학석사
 2013년 8월 : 고려대학교 전기전자전파공학부 공학박사
 2013년 9월~2015년 8월 : 삼성전자 소프트웨어센터 책임연구원
 2015년 9월~현재 : 충북대학교 전자공학부 조교수
 <관심분야> WSN, WBAN, VANET, Bluetooth