https://doi.org/10.7840/kics.2025.50.6.971

LoRa 네트워크의 SF별 상호 간섭 현상 분석 및 국내 환경 성능 검증

최 윤 제•, 최 희 호*, 황 건 하*, 신 경 섭°

Assessment of LoRa Network Performance in Domestic Environments and Investigation of Interference Phenomena by Spreading Factor

Yoon-je Choi•, Hee-ho Choi*, Geon-ha Hwang*, Kyung-seop Shin°

요 약

산업 환경에서 IoT는 중요한 기술로 주목받고 있다. Chirp Spread Spectrum 기술을 기반으로 한 LoRa는 비면허대역 사용, 128-bit AES 암호화 등 다른 IoT와 차별화되는 강점을 가지고 있다. 그러나 LoRa에 관한 실증 연구는 국내가 아닌 해외에서 수행된 경우가 많다. 또한, 두 신호가 동시에 발생할 때 수신감도에 큰 차이가 없을 경우 상호 간섭이 어느 정도 존재하는지에 대한 검증이 필요하다. 본 논문에서는 두 신호가 동시에 발생할 때 간섭이 일어나는지, 국내 야외 환경에서 LoRa가 어떤 성능을 보이는지를 실증하였다. 이 연구를 통해 (실내에서) 두 신호가 같은 Spreading Factor로 동작할 때에 간섭이 발생함을 입증했다. 또, LoRa가 (야외에서) 원거리의 LoS환경에서 원활하게 작동하지만, NLoS의 환경에서 거리가 멀면 통신이 불안정함을 확인했다. 이는 향후 국내 LoRa 연구에 주요한 실험적 근거로 사용될 것으로 기대된다.

키워드 : 사물 인터넷, 패킷 전달 비율, 평균 통신 시간, LoRa
Key Words : Internet of Things, Packet Delivery Ratio, Average Round Trip Time, LoRa

ABSTRACT

IoT is gaining traction as an important technology in industrial environments. LoRa, based on Chirp Spread Spectrum technology, has strengths that set it apart from other IoTs, such as the use of unlicensed bands and 128-bit AES encryption. However, empirical studies on LoRa have often been conducted overseas rather than in Korea. In addition, it is necessary to verify the extent to which mutual interference exists when there is no significant difference in reception sensitivity when two signals occur simultaneously. In this paper, we demonstrate whether interference occurs when two signals occur simultaneously and how LoRa performs in outdoor environments in Korea. This study proved that interference occurs only when both signals operate with the same spreading factor. It also confirmed that LoRa works smoothly in a remote LoS environment, but communication becomes unstable when the distance is large in an NLoS environment. This is expected to be used as a major experimental basis for future domestic LoRa research.

◆ First Author : Sangmyung University Department of Computer Science, etoile0626@naver.com, 학생회원
° Corresponding Author : Sangmyung University Department of Computer Science, ksshin@smu.ac.kr, 정회원
* Sangmyung University Department of Computer Science
논문번호 : 202411-284-B-RN, Received November 15, 2024; Revised January 4, 2025; Accepted January 15, 2025

Ⅰ. 서 론

IoT (Internet of Things, 사물인터넷)은 다양한 물리적 기기들이 인터넷을 통해 서로 연결되어 데이터를 수집, 공유, 처리하는 기술이다. IoT는 4차 산업혁명 시대에 핵심적인 기술이며, 그 필요성은 현대 사회에서 점점 더 중요해지고 있다. IoT는 효율성 증대, 데이터 기반 의사결정, 새로운 서비스 창출, 연결성 확대, 사회적 혜택 등을 통해 현대 사회의 다양한 문제를 해결하고 미래 성장을 촉진할 수 있는 중요한 기술이다.

IoT는 산업 환경에서도 많이 주목받고 있으며, 활용하기 위한 여러 방법이 있다. 가장 대표적인 예시로 smart factory(스마트 팩토리)가 있다. IoT를 통해 설비들과 작업자가 연결되어 생산성을 높일 뿐만 아니라, 현장에서 생성된 데이터를 수집하여 빅데이터 분석에 활용할 수 있게 된다[1]. 또한, 이상 고장 예지가 가능한 디바이스를 통해 사고를 미리 방지하는 등 산업 환경의 안전에도 기여를 한다[2]. 이처럼 IoT를 통해서 생산성과 안전성을 높여 현대 산업의 발전을 이룰 수 있게 되었다. 따라서 IoT는 현대 산업에 있어 필수적인 기술이 되었으며 그 중요성은 더욱 높아질 것이다.

LoRa는 IoT를 실현시킬 수 있는 기술 중 하나로 CSS(Chirp Spread Spectrum, 처프 스프레드 스펙트럼) 기술을 기반으로 한 장거리, 저전력 무선 통신 기술이다. 특히 LoRa는 비면허대역과 면허대역 중에서 비면허대역을 사용하여 간섭에 강하면서 장거리 전송의 장점 또한 가지고 있다. LoRa의 저전력으로 장거리 통신이 가능한 특성 덕분에 교량 자동계측 시스템[3], 농작물 모니터링, 교통, 자산 추적, 보안, 헬스케어 등 다양한 분야에서 사용될 수 있다[4].

LoRa는 통신 과정에서 128-bit AES 암호화를 지원하여 전송되는 데이터의 기밀성과 무결성을 보호할 수 있다. 이는 IoT 환경에서 중요하게 여겨지는 보안 요구사항을 충족시킨다. 또한, 앞서 말한 CSS 기술을 사용하여 다른 신호나 장애물로 인한 간섭을 최소화한다. 이러한 기능들은 IoT 시스템에서 LoRa가 차별성을 가지게 만들어준다. 이러한 배경 속에서 IoT 분야에서 LoRa 기술에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있으며, 이에 따라 LoRa의 중요성이 강조되고 있다.

SF(Spreading Factor, 확산인자)는 LoRa 통신에서 주파수 spread spectrum을 결정하는 중요한 요소 중 하나다. 여러 연구에서는 서로 다른 SF를 사용하는 신호가 직교한다고 말하지만, 두 신호가 동시에 발생할 때, 수신 감도에 큰 차이가 없을 경우 상호 간섭이 발생할 가능성이 있다는 연구가 존재한다[5] [6]. 그러므로, 서로 다른 SF를 사용하는 경우에 신호가 완전히 직교하는지 실제 기기에서 확인할 필요가 있다. 또한, LoRa의 알려진 스펙은 대부분 한국이 아닌 유럽 등의 외국에서 측정된 사례가 많다. 따라서 한국, 특히 수도권에서도 LoRa가 무리 없이 통신이 이루어지는지 검증해 볼 필요가 있다.

본 논문에서는 서로 다른 SF를 사용하는 LoRa 신호가 동시에 발생할 때 발생하는 상호 간섭 현상에 대해 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해서 실제 LoRa 단말을 이용하여 Tx, Rx, 간섭자를 구현하고 실험을 진행하여 관찰한다. 더불어, 실험실 안에서뿐만 아니라 한국의 야외 환경에서도 이론적으로 표기된 LoRa의 스펙만큼 LoRa가 잘 작동되는지 LoS(Line of Sight) 환경과 NLoS(Non Line of Sight) 환경 두 가지 경우로 나누어 검증한다.

Ⅱ. 관련 연구

지금까지 연구들은 국내가 아닌, 해외에서 이루어진 연구가 주를 이루었다. 유럽권에서 진행한 장거리 실험들을 통해 LoRa의 성능을 측정하고자 하는 실험도 있었으며[7], 국내의 경우에도 수도권 지역이 아닌 부산에서 LoRa의 성능 변화[8]를 연구한 결과만 있을 뿐이었다. SF의 상호 간섭을 분석하지는 않았으나, 이를 염두에 두어 HAT-LoRa 모델[9]을 제시하는 연구 등도 있었다. 본 연구는 서로 다른 SF를 사용할 때 나타나는 상호 간섭과 국내 환경 성능 검증에 중점을 두어 상호 간섭 현상을 통신에 걸리는 시간을 통해 검증하고 분석하고자 한다.

Ⅲ. 본 론

본 논문의 실험은 SF의 상호 간섭을 확인하기 위한 실내 간섭 실험과, LoRa의 성능을 측정해 보기 위한 야외 실험 2가지로 나누어져 있다. 실험에 사용된 통신 단말기로는 Semtech사의 SX1272와 STMicroelectronics사의 NUCLEO-F446RE STM32 Nucleo-64 보드를 결합한 통신 모듈을 사용하였으며, LoRaWAN 기능은 C++ 기반의 mbed SDK[10]를 사용하여 구현하였다.

모든 실험은 앞서 설명한 단말기가 사용되었다. 그 중에서 간섭 실험의 경우, 그림 1과 같은 배치를 따른다. 안테나 끝을 기준으로 50cm 떨어진 거리에서 마주 보는 한 쌍이 Tx와 Rx의 역할을 하고, Tx, Rx와 직교하는 방향으로 25cm 떨어진 거리에 SF 간섭을 해줄 간섭자

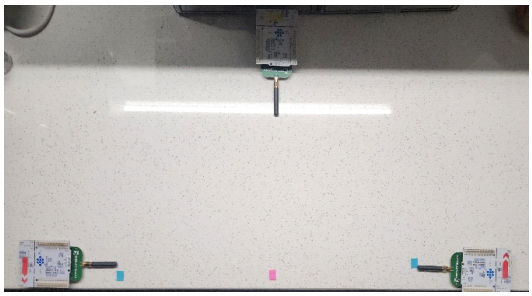


그림 1. 간섭 실험 모듈
Fig. 1. LoRa modules at interference experiment

Tx를 배치한다. 간섭자 Tx의 패킷은 Tx나 Rx가 받을 수 없고, 특정 SF의 패킷을 무한히 보냄으로써 SF 상호 간섭을 일으키게 된다. 실외 실험의 경우 Tx와 Rx를 사전에 정해둔 장소로 이동하여 통신을 시도한다.

실험에서 LoRa 모듈이 어떻게 동작하는지 그림 2에서 순서도를 통해 나타내고 있다. LoRa 모듈에는 IDLE(대기) 상태, Tx(송신) 상태, ACK(ACK를 기다리는 상태) 상태로 나누어져 있다. 먼저, IDLE 상태는 데이터의 수신이 준비되어 있는 상태로 주파수 대역을 모니터링하고 데이터를 수집할 준비를 하는 상태이다. 다음으로 Tx 상태는 데이터를 전송하는 상태로 미리 설정된 파라미터를 사용하여 데이터를 패킷으로 만들고 전송한다. 마지막으로 ACK 상태는 패킷을 보내고 나서 패킷에 대한 ACK(확인 응답)를 받는 상태이다. ACK의 도착 여부로 데이터의 전송 여부를 확인한다.

Tx Mode는 IDLE 상태에서 데이터를 보낼 것이 생기면, Tx 상태로 전환 후 Rx에게 패킷을 전송한 후 ACK 상태로 전환하여 ACK를 기다린다. ACK 상태에서 정해진 시간 동안 ACK를 받지 못한다면, Timeout이 발생해 다시 Tx 상태로 전환하여 패킷을 재전송하게

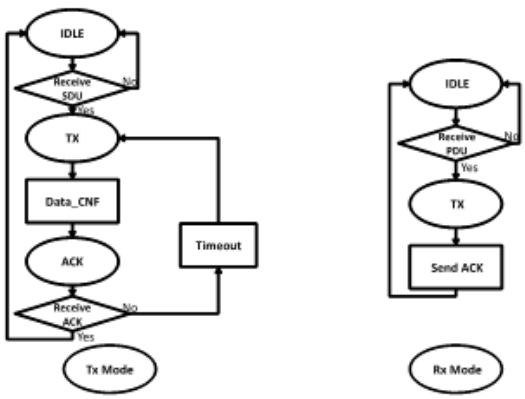


그림 2. Tx/Rx 상태 순서도
Fig. 2. Tx/Rx state transition flowchart

된다. 그러나 ACK 상태에서 ACK를 잘 받게 되면, Tx Mode를 마치고 IDLE 상태로 돌아오게 된다. Rx Mode는 IDLE 상태에서 대기하다가 데이터가 들어오게 되면, Tx 상태로 전환하여 ACK를 전송하고 다시 IDLE 상태로 전환한다.

위 내용처럼 작동하도록 mbed SDK에서 제공하는 기본적인 LoRaWAN 계층의 스켈레톤 코드를 사용하여 각 실험별 Tx, Rx를 구현하였고, 기본 코드에서 제공하는 PHYMAC 레이어의 일부 파라미터를 변경하여 SF 값을 바꾸는 등 실험 조건에 맞게 설정하였다. 통신에 걸린 시간, RSSI(Received Signal Strength Indicator, 수신 신호 세기) 값 등 수집한 실험 데이터는 응용계층 레벨에서 측정하여 PuTTY 프로그램에 출력하여 확인하였다.

다만, 간섭 실험의 경우 간섭으로 인한 시간 차이를 확인하기 위해 간섭 노드는 최대한 빠르게 많은 패킷을 보내게 하였다. 그 결과 ACK를 받지 않는다고 설정하여 Tx Mode에서는 ACK 상태가 없이 Tx 상태에서 바로 IDLE 상태로 전환되고, Rx Mode에서는 Tx 상태로의 전환 없이 항상 IDLE 상태에만 존재한다.

실외 실험의 경우 다양한 변수들로 인해 데이터가 유실되거나 손상되는 것을 방지하고자, CRC/FEC 인, 디코딩을 코드에 구현하였다. FEC(Forward Error Correction) 기능을 통해 통신 중 깨진 비트를 복구하는 데 도움을 주고, CRC(Cyclic Redundancy Check) 기능을 통해 메시지가 깨져 원래 와야 할 메시지가 오지 않을 경우를 검출해내었다. CRC의 경우 CRC-8 다항식을 사용하였고, FEC의 경우 1비트를 3비트로 늘렸다가 다시 1비트로 줄이는 간단한 형태의 Repetition Code를 적용하였다.

3.1 간섭 실험

SF에 따른 간섭 영향을 살펴보고 분석하기 위해 간섭 실험을 진행하였다. 앞선 거리 실험과는 다르게, CRC나 FEC 같은 기능이나 ACK 상태가 없이 단순히 빠르게 Tx는 전송만 하고, Rx는 수신만 하는 모듈로 구성되어 있다. 간섭 실험은 정해진 양의 패킷을 전부 받는데 걸리는 시간만 측정하기에, 패킷의 크기를 최대한 작게 하기 위함이다. 다만, Tx에서 쉴 새 없이 패킷을 보낼 수 없어서 air time을 고려해야 하는데, 이를 위해 패킷을 하나 보내고 나면 SF별로 고정된 값의 딜레이를 주어 전송 지연시간을 적용하였다. 간섭자 Tx의 경우 고정된 값이 아닌 (Tx의 딜레이)~(Tx의 딜레이의 2배) ms의 범위를 가지는 값으로 설정하였다.

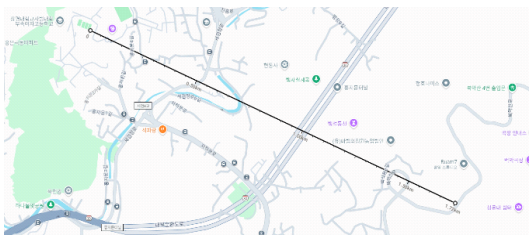
실험 방식은 Tx는 데이터 패킷을 Rx에게 지속적으로 전송하면, Rx는 100개의 패킷이 올때까지 걸린 시간을 측정한다. 이 사이클을 10번 반복하는 방식으로 진행하였다. 간섭자 Tx를 켠 경우와 켜지 않은 경우로 나누어 진행하였으며, 간섭 실험에서 수집되는 데이터는 실패 메시지의 개수와 패킷 100개를 받는데 걸린 시간으로 총 2가지지만, 본 연구에서는 실패 메시지의 개수보다 걸린 시간에 더 중점을 두고자 한다.

3.2 야외 실험

LoRa가 한국의 야외 환경에서도 잘 작동하는가를 보기 위해서, LoS 환경과 NLoS 환경의 경우에서 모두 실험했다. 실험 장소는 아래의 그림 3, 4로 A Site는 상명대학교와 북악산에서, B Site는 김포 전류리포구와 한강 조류생태공원에서, C Site는 향동동에서 진행하였다.

LoS 환경의 경우 비교적 짧은 거리인 A Site(1.7km)와 비교적 긴 거리인 B Site(5.6km)에서 진행하였고, NLoS 환경의 경우 C Site에서 0.5km부터 0.5km 단위로 2km까지 4 지점에서 실험을 진행하였다.

실험 방식은 100개의 패킷을 보냈을 때, Tx가 100번째 ACK를 받으면 종료하는 것을 1사이클로 해서 모든



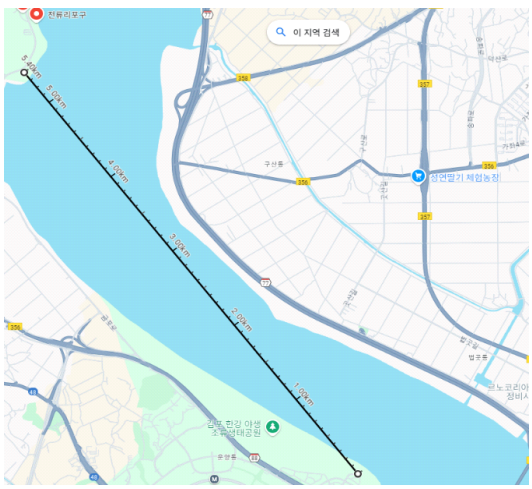


그림 3. LoS 환경 (A Site, B Site)
Fig. 3. LoS Experiment Site (A Site, B Site)

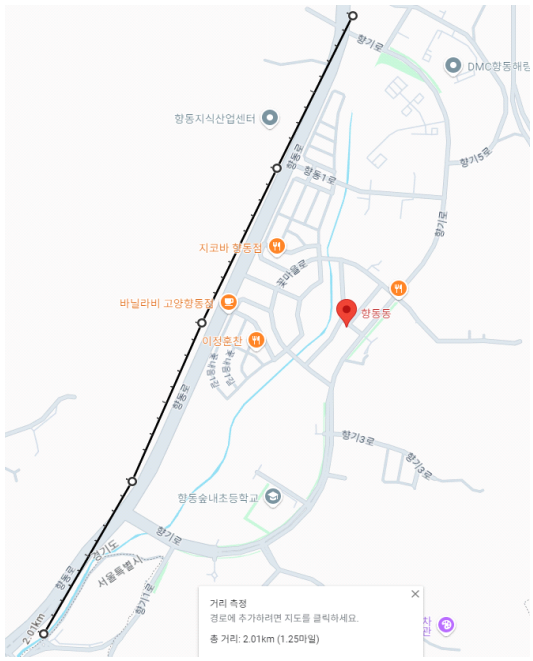


그림 4. NLoS 환경 (C Site, 0.5km~2km)
Fig. 4. NLoS Experiment Site

SF별로 총 5번씩 반복하는 방식으로 진행했다. 사이클이 종료될 때 수집되는 데이터는 평균 RSSI 값, 통신에 걸린 시간, PDR(Packet Delivery Rate) 등이 존재한다. PDR은 Tx에서 계산되며, 이를 계산하는 수식은 (1)과 같다.

$$\mathrm{PDR} = \frac{\text{Received Packets}}{\text{Sent Packets}} \tag{1}$$

Tx가 보낸 모든 패킷들 중에서 성공적으로 전송한 패킷의 비율을 계산하면 된다. 본 논문에서는 성공적으로 전송한 패킷을 Tx가 받은 ACK의 개수로 계산하였다.

Ⅳ. 실 험

각 실험들에서 PDR과 RSSI 그리고 시간을 측정하기 위해서 LoRa 단말기에 대한 통신 매개변수를 Tx와 Rx 모두 설정하였다. LoRa Spectrum 확산 계수는 대부분의 실험이 SF7~SF12으로 설정되었으나, NLoS 환경과 간섭 실험의 간섭자 Tx는 SF7, SF10, SF12으로 설정하였다. 실험에서 사용된 다른 세부 설정 변수들은 표 1에 명시된 대로 구성하였다. 모든 실험은 몇 번의 실험을 거쳤기에, 평균값을 기반으로 결과를 정리하였다.

표 1. LoRa 전송 파라미터
Table 1. LoRa parameters

Parameter	Value
Nodes	2~3
Transmission Power	14dB
Channel Bandwidth	125 kHz
Spreading Factors	SF7~SF12
Coding Rate	4/15
Preamble Length	8 symbols
Frequency Band	922.1 MHz

4.1 간섭 실험 측정 결과

그림 5는 간섭 여부에 따른 전송시간의 변화를 보여준다. 특히, 이번 실험에서 간섭자로 사용되었던 SF 7, 10, 12를 보면 다른 조건들과 비교해 보았을 때 SF7에서 간섭이 일어났을 때 평균 전송 시간은 간섭이 일어나지 않았던 시간과 비교하여 약 71% 정도 증가하였고, SF10과 SF12의 경우 각각 약 443%와 487% 정도의 증가율을 보여주고 있다. 다시 말해, 간섭자 Tx와 같은 SF에서 상대적으로 많은 전송 시간을 차지하는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 간섭자가 있으면 통신에 간섭을 받아 해당 SF에서 전송을 마치는데 많은 시간이 소요된다고 해석된다. 또한, SF가 클수록 간섭자가 존재했을 때 걸리는 통신 시간이 큰 폭으로 늘어나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 SF가 클수록 간섭에 더 취약한 것으로 분석된다.

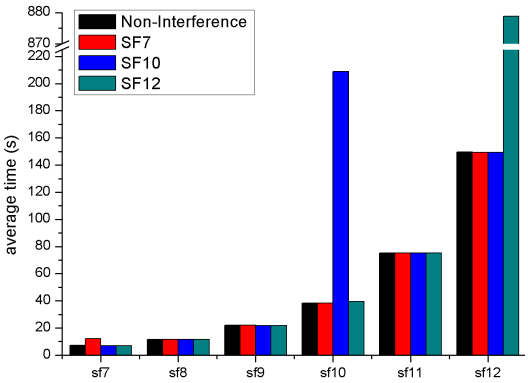


그림 5. 간섭 실험 결과
Fig. 5. interference experiment result

4.2 야외 실험 측정 결과

그림 6, 7은 A, B, C Site 등 야외에서 실험한 결과의 평균 전송 시간과 평균 PDR를 그래프로 나타낸 것이다. 3.1절에서 설명한 방식대로 진행하여 거리와 LoS

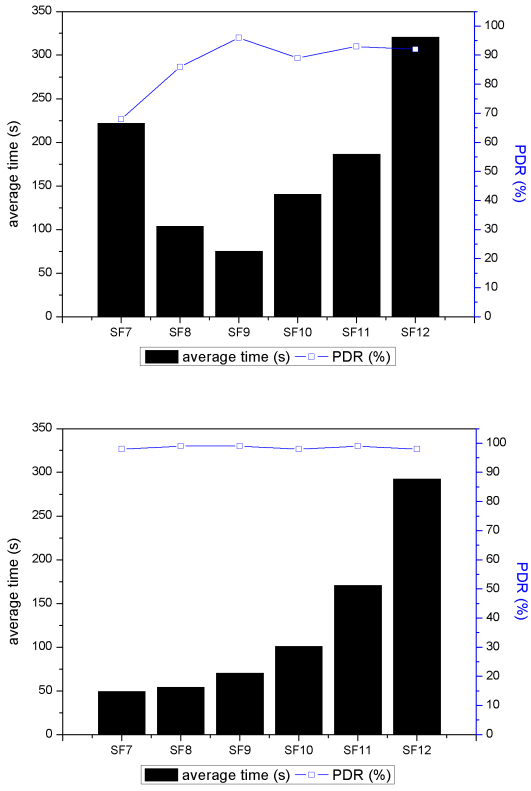


그림 6. 야외 LoS(A, B) 실험 결과
Fig. 6. Outdoor LoS(A, B) experiment result

보장 여부에 따라 각 실험들이 독립적으로 수행되었다.

LoS 환경에서의 실험 결과는 그림 6에서 확인할 수 있다. LoS가 보장되었던 A Site과 B Site 모두 대부분의 SF에서 높은 수치의 PDR을 보여주고 있었다. 다만, B Site의 경우 SF7의 평균 전송 시간과 평균 PDR이 A Site과 비교했을 때 평균 전송시간은 약 350% 정도 늘어나고 평균 PDR도 31% 정도 감소하는 등 같은 LoS 환경임에도 SF7에서는 다른 양상을 보여주고 있다. 이는 B Site에서 노드 간 거리가 5.6km로 SF7이 잘 작동하는 거리가 아닌 것이 원인임을 추론할 수 있다.

또한, NLoS 환경인 C Site에서는 1km까지는 비교적 짧은 평균 전송시간을 가지고 높은 수치의 평균 PDR을 유지하는 등 통신이 원활하게 작동하는 듯했으나, 1.5km 지점에서의 그래프를 살펴보면 SF10에서 평균 PDR이 약 30~40% 정도 감소하고 평균 전송시간이 약 600초 정도로 앞선 0.5km나 1km 지점에 비해서 대폭 늘어나고 있음을 확인했다. 특히, SF7의 경우 1.5km 지점에서 연결조차 되지 않고 있고, SF12의 경우도 평균 PDR이 20% 이상 감소하는 것을 관찰하였다.

2km 지점에서는 어떤 SF에서도 통신이 되지 않음을

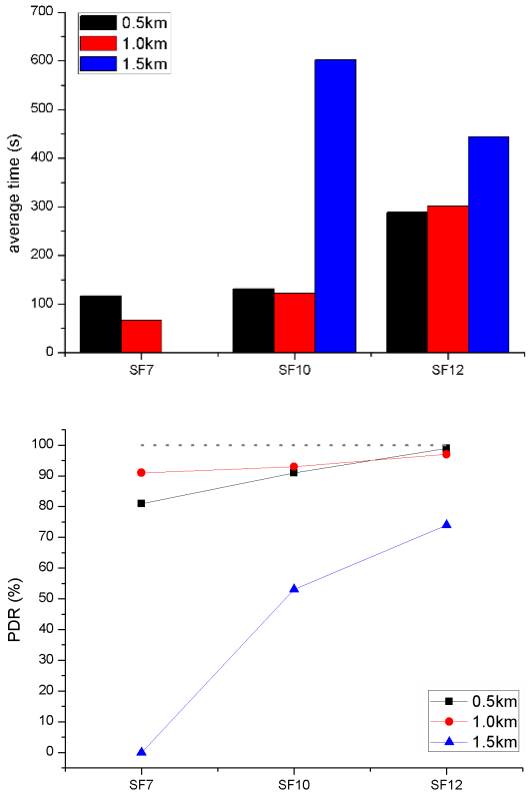


그림 7. 야외 NLoS(C Site) 실험 결과
Fig. 7. Outdoor NLoS(C Site) experiment result

확인하였다. 이는 LoRa가 NLoS인 환경에서는 2km라는 LoS 대비 비교적 짧은 거리에서도 통신이 불안정하다는 것을 위의 그림 7을 통해 명확히 보여준다.

V. 결 론

본 논문에서는 LoRa 단말기를 이용하여 서로 다른 SF가 상호 간섭을 발생시키는지 확인하고, 국내 지역에서 LoRa의 성능을 검증해 보았다. 같은 SF의 신호들을 만나면 간섭이 일어나는 것을 확인했으며, SF가 클수록 간섭이 더 심한 것으로 보였다. 더불어, 국내의 환경에서 LoS가 보장된 지역이라면 5km가 넘어도 원활하게 통신이 가능했지만, NLoS인 경우에는 2km를 못 가서 통신이 어렵다는 사실을 확인하였다. 본 연구는 국내에서 LoRa 네트워크 환경의 성능을 실증해 보았다. 이를 토대로 NLoS의 환경에서도 장거리 통신 성능을 높일 수 있는 방안에 대한 연구 범위의 확장 및 실제 환경에서의 검증이 필요할 것으로 보인다.

References

[1] J.-H. Oh and J.-D. Kim, "A study on strategic utilization of smart factory: Effects of building purposes and contents on continuous utilization," *Asia Pacific J. Small Business*, vol. 41, no. 4, Dec. 2019. (https://doi.org/10.36491/APJSB.41.4.1)

[2] D.-H. Ryu and T.-W. Choi, "Development of the compact smart device for industrial IoT," *J. KIECS*, vol. 13, no. 4, pp. 751-756, Aug. 2018. (https://doi.org/10.13067/JKIECS.2018.13.4.751)

[3] J. Park, S.-H. Park, S.-J. An, W.-J. Park, and J.-H. Kim, "Bridge wireless measurement system development based on LoRa IoT," *J. KSMI*, vol. 23, no. 7, pp. 164-171, Dec. 2019. (http://doi.org/10.11112/jksmi.2019.23.7.164)

[4] W. Cho, "LoRa for LPWA network: Overview and its performance enhancement technologies," *J. KIECS*, vol. 14, no. 2, pp. 283-288, Apr. 2019. (https://doi.org/10.13067/JKIECS.2019.14.2.283)

[5] D. Croce, M. Gucciardo, S. Mangione, G. Santaromita, and I. Tinnirello, "Impact of LoRa imperfect orthogonality: Analysis of link-level performance," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 4, pp. 796-799, Apr. 2018. (https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2797057)

[6] S. Byeon, "The impact of configuration factors on orthogonality and communication quality," in *Proc. of KICCE Spring Conf. 2022*, pp. 86-88, May 2022.

[7] N. Jovalekic, V. Drndarevic, E. Pietrosemoli, I. Darby, and M. Zennaro, "Experimental study of LoRa transmission over seawater," *Sensors 2018*, vol. 18, p. 2853, Aug. 2018. (https://doi.org/10.3390/s18092853)

[8] D. H. Yi and S. C. Kim, "Analysis of computer simulated and field experimental results of LoRa considering path loss under LoS and NLoS environment," *J. KICS*, vol.

42, no. 2, Feb. 2017. (https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.2.444)

[9] S. Byeon, "Harmonic ACK transmissions from multiple gateway considering the quasi-orthogonal characteristic of LoRa CSS spreading factors," *J. KIICE*, vol. 26, no. 6, pp. 897-906, Jun. 2022. (https://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.6.897)

[10] ARM, *mbed studio documentation*, Retrieved Jun. 20, 2023, from https://os.mbed.com/docs/mbed-studio/current/introduction/index.html

최 윤 제 (Yoon-je Choi)

2025년 2월 : 상명대학교 컴퓨터과학과 학사

<관심분야> 네트워크, IoT

[ORCID:0009-0004-2527-9412]

최 희 호 (Hee-ho Choi)

2025년 2월 : 상명대학교 컴퓨터과학과 학사

<관심분야> IOT, 이동통신

[ORCID:0009-0001-1508-744X]

황 건 하 (Geon-ha Hwang)

2022년 2월 : 상명대학교 컴퓨터과학과 학사

2022년 9월~현재 : 상명대학교 컴퓨터과학과 석박사통합과정

<관심분야> 통신공학, IoT 네트워크, 인공지능

[ORCID:0009-0009-2353-2759]

신 경 섭 (Kyung-seop Shin)

2011년 1월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사

2015년 1월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사

2015년 2월~2017년 8월 : KT 융합기술원 인프라연구소 5G TF 선임연구원

2017년 9월~2020년 3월 : 세명대학교 컴퓨터학부 조교수

2020년 3월~현재 : 상명대학교 컴퓨터과학과 부교수

<관심분야> 이동통신, IoT, 네트워크, 인공지능

[ORCID:0000-0002-3867-1921]