

## 산업현장의 LPWA 적용을 위한 건물 내부 통신 성능 측정

# Measurement of Communication Performance for Application of LPWA in Industrial Field

권혁<sup>1</sup> · 진경복<sup>1</sup> · 오창현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

<sup>2</sup>한국기술교육대학교 전기전자통신공학부

Hyuk Kwon<sup>1</sup> · Kyoung-Bog Jin<sup>1</sup> · Chang-Heon Oh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungcheongnam-do, 31253, Korea

<sup>2</sup>Department of Electrical, Electronics and Communication Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungcheongnam-do, 31253, Korea

### [요 약]

LPWA는 넓은 커버리지를 통해 구축비용 및 시간이 절감되는 기술이다. 하지만 LPWA는 UHF 전파를 사용하는 ISM 대역으로 직진성이 강해 실내에서는 성능이 매우 떨어지지만 실내에서도 다른 통신에 비해 높은 성능을 낼 수 있는 가능성이 있기 때문에 본 논문에서는 LPWA 기술 중 LoRa를 적용하여 실내 통신 성능을 측정하는 연구를 진행하였다. 이를 위해 4층에 데이터 수신 모듈을 설치한 후 동일 층부터 1층까지 건물의 끝에 송신 모듈을 배치한 후 데이터를 수집하였다. 실험결과 1층 송신 모듈의 데이터를 98~99% 확률로 수집 가능하였으며 최저 RSSI는 약 -116 dBm을 나타내었다. 따라서 확산인자가 12일 때 최대 수신감도 -136 dBm을 갖는 LoRa의 스펙을 고려할 경우 산업현장 건물 내부의 LPWA 적용을 충분히 고려할 수 있을 것으로 기대된다.

### [Abstract]

LPWA is a cost-effective and time-saving technology with wide coverage. However, the LPWA is an ISM band that uses UHF radio waves, and its performance is very poor indoors because of its strong linearity. But, because of the possibility of achieving high performance compared to other communication in the room, this paper has studied the indoor communication performance by applying LoRa in LPWA technologies. After installing the data receiving module on the 4th floor, the transmission module was placed at the end of the building from the same floor to the 1st floor, and the data was collected. As a results, it installed on the 1st floor can be collected data with 98 ~ 99% probability, and the lowest RSSI is about -116dBm. Thus, considering the specification of LoRa with a maximum reception sensitivity -136dBm when the spreading factor is 12, the application of LPWA in the industrial field can be fully considered.

**Key word** : LPWA, Industrial field, wireless data transmission, Industrial 4.0, Internet of things.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.1.90>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 15 January 2019; Revised 28 January 2019

Accepted (Publication) 26 February 2019 (28 February 2019)

\*Corresponding Author; Chang-Heon Oh

Tel: +82-41-560-1215

E-mail: [choh@koreatech.ac.kr](mailto:choh@koreatech.ac.kr)

## I. 서론

Industry 4.0은 독일 산업 부흥 정책인 ‘High-Tech Strategy 2020 Action Plan’의 일환으로 추진하는 전략 중 하나로, 자동차, 기계 등 제조업에 ICT를 접목하는 모든 생산 공정, 조달 및 물류, 서비스까지 통합적으로 관리하는 스마트 팩토리 (smart factory) 구축을 목표로 한다. 이러한 Industry 4.0의 개념은 국내에서 산업혁신 3.0 정책이 입안되면서 2020년까지 소프트웨어와 정밀 기계 분야와 인터넷을 기반으로 하는 모든 제조업과 서비스 분야에서 사용 될 것이다. 공장생산관리 서비스에서도 이러한 방향에 맞추어 현장에 다양한 장비에 부착된 센서들이 네트워크를 통해 실시간으로 현장 정보를 서버로 전송하고 서버에서 처리하여 명령을 다시 장비로 전송하는 과정이 자동으로 진행되는 IoT 환경으로 진화하고 있다. 하지만 산업현장에서 IoT 환경을 구축하기 위한 비용과 시간은 생산성을 저하시키고, 구축비용으로 인한 손실이 부담이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 IoT 환경 구축 시간을 최소화하고, 비용을 최대한으로 절감하는 방안을 강구해야한다[1]-[6].

UHF(ultra high frequency)전파는 직진성이 강한 특징을 가지며, 대역폭이 넓기에 데이터 통신에 널리 사용되고 있다. 대신 파장이 짧은 만큼 전송 거리가 줄어들기 때문에 중계소나 기지국을 더 많이 설치해야하는 단점이 존재한다. LPWA(low power wide area) 기술 중 LoRa는 매우 넓은 커버리지를 가지는 UHF 대역의 통신 기술이다. 실외에서는 수십 Km까지 통신이 가능하기 때문에 이 기술을 산업현장에 도입할 경우 타 기술에 비해 구축비용을 절감시킬 뿐만 아니라, 무선이라는 특징으로 인해 구축시간 또한 절감할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 이 기술은 실외에 적합한 통신기술임으로 실내에 도입하기 위해서는 실내 환경에서의 성능을 측정할 필요가 있다[7].

본 논문에서는 LPWA 기술 중 비면허대역을 사용하는 LoRa를 산업 현장 건물 내부에 적용하기 위해 LoRa 기반 사설 통신망 구축 모듈을 제작하여 건물 내부에 송·수신기를 설치한 뒤 수신 신호 강도 및 신호 대 잡음비, 데이터의 수신율을 통해 LPWA의 건물 내부 통신 성능을 측정하였다.

건물 내부 환경에서 LPWA의 성능을 측정하기 위해 LPWA 통신 모듈을 제작하여, 송신 모듈과 수신 모듈에 대한 프로그램을 개발하여 삽입하였다. 건물 내부 통신 시 확산인자(SF: spreading factor) 설정의 영향을 확인하기 위해 확산인자가 낮아 가장 빠르게 데이터를 전송할 수 있는 SF7과 확산인자가 높아 데이터가 느리게 전송되는 대신 안정적이고, 가장 멀리 데이터를 전송할 수 있는 SF12로 실험을 진행하였다. 건물 4층 중간에 수신 모듈을 배치하고, 건물의 끝에 수신모듈을 배치하여, 4층에서부터 1층까지 실험을 진행하였다.

본 논문의 구성은 2장에서는 LPWA에 대한 내용을 설명하고, 3장에서는 통신 모듈 및 실험환경에 대해 설명한다. 4장에서는 실험을 통한 결과를 도출하였으며, 마지막 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 관련연구

### 2-1 LoRa 주파수의 특징

전파는 주파수가 낮을수록 파장이 길어져 장파라고 하고, 주파수가 높을수록 파장이 짧아져 단파라고 한다. 주파수와 파장의 길이에 따른 전파의 분류는 표 1과 같다. LoRa는 ISM 대역의 UHF 전파를 사용한다. UHF는 직진성이 강해 신호의 도달거리는 가시거리 (line of sight distance)에 한정된다. 470 ~ 890 MHz 범위의 주파수가 텔레비전 방송에 사용되는 외에 육상이나 해상, 항공 이동통신, 무선호출, 항공 무선 항행 업무 등 다양한 통신에 사용된다. 1,000 MHz 이상의 주파수는 마이크로파라고 하고, 다중통신 회선에 널리 사용된다. UHF는 인공위성의 발전에 따라 위성통신, 지구 탐사, 전파 천문 등 우주 업무에도 널리 사용되는 주파수대이다.

ISM 대역은 산업, 과학, 의료용 기기에서 사용가능한 주파수 대역으로, 국제 전기 통신 연합(ITU)-R에서는 ISM 대역으로 13.553~13.567 MHz, 26.975~27.283 MHz, 40.66~40.70 MHz, 433.05~433.79 MHz(1지역), 902~928 MHz(2지역), 2.4~2.48 GHz, 5.725~5.875 GHz, 24~24.25 GHz, 61~61.5 GHz, 122~123 GHz, 244~246 GHz를 지정하고 있다. 그러나 지역에 따라 지정한 ISM 대역이 일부 지정되어 있지 않으며, 3지역인 우리나라의 경우에는 433 MHz 대역과 902 Mhz 대역은 ISM 대역이 아니다. 또한 이 ISM 대역을 통신 주파수 대역으로 사용하여, 허가가 불필요한 소출력 무선기기들이 많이 연구 및 개발이 되고 있으며, 이 주파수 대역을 사용하는 통신 장비는 ISM 대역을 사용하는 다른 기기들과 이대역을 사용하는 통신 장비 간에 간섭을 용인한다는 조건에서 사용할 수 있다[8].

표 1. 전파의 분류

Table 1. Classification of radio waves.

Abbreviation	Freq. Range	Band	Wavelength Range	Applications
VLF	30 Khz or less	Super-long wave	10,000 m or more	Maritime communication
LF	30 Khz ~ 300 Khz	Long wave	1,000 ~ 10,000 m	Aviation communication
MF	300 Khz ~ 3 Khz	Middle wave	100 ~ 1,000 m	International short wave communication
HF	3 Mhz ~ 30 Mhz	Shortwave	10 ~ 100 m	Maritime communication, amateur
VHF	30 Mhz ~ 300 Mhz	Micro wave	1 ~ 10 m	TV, FM radio
UHF	300 Khz ~ 3 Ghz	Decimeter wave	0.1 ~ 1 m	Mobile phone
SHF	3 Ghz ~ 30 Ghz	Centimeter wave	1 ~ 10 cm	Satellite communication
EHF	30 Ghz ~ 300 Ghz	Millimeter wave	1 ~ 10 mm	Space communication

## 2-2 LPWA 통신 기술

### 1) LTE-M

LTE-M (machine type communication)은 글로벌 표준 네트워크 기술로서, 3GPP 기반 기술이다. Release 8에 정의된 cat. 1 단말을 이용하여 release 12에서 정의된 power saving mode(PSM)기능을 추가하였다. 전국망이 구축되어 있는 LTE 망을 이용하므로 전국 서비스가 가능하고, 면허대역 주파수를 사용하므로 주파수 간섭으로 인한 통신품질의 저하가 없으며, 로밍을 통해 글로벌 확장이 가능하다. 3GPP는 더 효율적인 소물인터넷 통신을 위해 release 12에서 cat. 0를 표준화하였고, release 13에서는 cat. M을 표준화하고 있으며 동시에 clean-slate solution으로 NB-IoT를 표준화하고 있다.

### 2) LTE-NB(NB-IoT)

LTE-Narrow-band나 Narrow-Band IoT를 의미한다. LTE-M보다 더 좁은 LTE 대역을 사용하여 저가, 장기 배터리 사용, 대규모 디바이스 연결을 목표로 하는데, LTE 상용 주파수 밴드를 그대로 사용하거나 혹은 가드밴드처럼 사용되지 않는 대역에서도 서비스가 가능하다.

### 3) LoRaWAN™

프랑스 기업인 Cycleo에서 개발한 저전력 저속 장거리 통신 비표준 기술(LPWAN: low power wide area network)로써 LoRa-Alliance를 통해 협의체를 구성하고 있고, 국내에서는 SKT가 최초로 LoRa 망을 포설하였다. LoRa를 이용하기 위해선 신규 네트워크 망 구축(LoRa 기지국)이 필요 한데, 반면 대역인 ISM 대역을 이용하므로 주파수 라이선싱이 불필요하며, 기존 LTE 망에 비해 수 배 ~ 수십 배의 커버리지가 넓어 기지국 건설 비용을 수십 분의 1로 축소할 수 있는 장점이 있다. LoRa는 확산인자기반의 모듈레이션을 사용하여 noise floor 이하로 디모듈레이션이 가능한데 이는 FSK 변조방식보다 30 dB를 향상시킨다. IEEE802.15.4g 기반의 LoRa-Alliance 개방형 표준을 지향하는 개방성을 특징으로 그 세력을 넓혀가고 있다. LoRa의 특징을 정리하면 다음과 같다.

표 2. LoRaWAN™ 특징

Table 2. LoRaWAN™ Features.

Communication speed	0.3 ~ 5 kbps
Radio wave reaching distance	5 ~ 45 km
Spread spectrum based	
Improved sensitivity than FSK	
Resistant to noise and jamming	
Spreading codes orthogonal	
Multiple signals use the same channel	
Stronger to frequency offset than DSSS	

### 4) SigFox

SigFox가 개발한 통신 기술로써, UNB(ultra narrow band) 통신 기술을 사용한다. 통신 속도는 0.01 ~ 1 kbps에 다다르며 전파도달 거리는 약 10 ~ 50 Km이다. 주로 단 방향 통신에 적합한 통신규격으로써, 다양한 사물에 칩셋 기반의 통신 모듈을 연결, 가까운 거리에서 서로 꼭 필요한 데이터들만 주고받을 수 있도록 하여 별도의 망 구축비용과 전력 소모를 최소화하는 점에선 LoRa와 유사하나 SigFox 개발사 자체규격을 지향한다는 점에서 LoRa와 차별된다[9]-[12].

## III. 실험 환경 구성

LPWA 기술 중 개방성을 특징으로 하는 LoRaWAN의 기술을 산업현장에 적용시키기 위해 private LoRa 모듈을 개발하였다. Private LoRa 통신 모듈의 RF 칩은 Semtech사의 sx1276을 사용하였으며, 제어 모듈의 MCU는 ST마이크로일렉트로닉스사의 STM32L125RE를 사용하였다. 전원부는 배터리를 통해 전원을 공급하고 배터리를 충전하는 역할을 수행한다. 그림 1은 실험에 사용된 private LoRa 모듈의 모습이다.

개발된 private LoRa 모듈을 이용하여 데이터를 전송하고 수신하기 위해 프로그램을 개발하여 삽입하였다. 프로그램에서 적용된 주요 환경 변수는 표3과 같다[12].

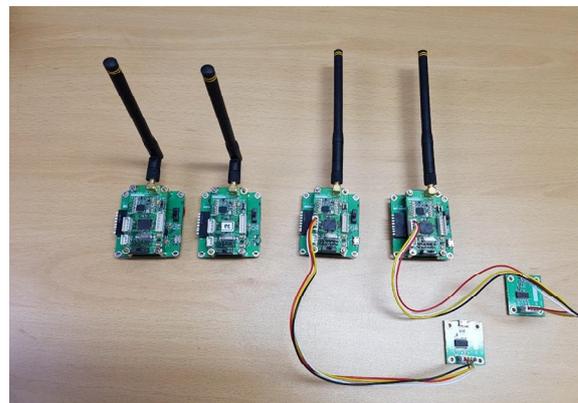


그림 1. 실험에 사용된 Private LoRa 모듈

Fig. 1. The Private LoRa module used in the experiment.

표 3. RF 설정 Parameter

Table 3. RF Parameter Setting.

Parameter	value	
Frequency	SF7	918.3 Mhz
	SF12	919.3 Mhz
Spreading Factor	SF7, SF12	
Bandwidth	125 Khz	
coding Rate	4/5	
Transmit Power	14 dBm	
Antenna Gain	2 dBi	
packet length	12	
Tx Period(s)	3	

또한 LoRa는 세 가지의 클래스를 지원하게 되며, 각 클래스의 동작은 다음과 같다.

- A class

LoRa 디바이스와 LoRa 게이트웨이 사이의 A class 통신은 LoRa 디바이스가 게이트웨이에게 up-link 전송을 수행한 이후에 두 번에 걸쳐 down-link로 수신할 수 있다. 이때 LoRa 디바이스는 Tx 전에는 Tx와 Rx를 꺼두었다가 Tx 이후 정해진 시간에 잠깐 Rx 신호를 감지한다. 즉, A class를 사용하면 Rx를 수신하기 위해서 Tx를 사용해야 한다. 그렇기 때문에 Tx 위주의 서비스나, 상시 전원을 사용하지 않고 배터리로 운영하는 경우에 사용한다. 그림 2는 A class의 운영을 표현한 것이다.

- B class

A Class가 up-link 위주의 class라면 B class는 down-link를 고려하고 A class에 비해 낮은 지연시간을 가지는 class이다. B class는 일정 시간 간격마다 Rx를 수신할 수 있는 상태가 되고, 해당 타이밍에 LoRa gateway로부터 데이터를 수신할 수 있다. B class는 A class와 달리 Rx 위주의 서비스를 수행하기 때문에 배터리 수명을 고려해야한다. 그림 3은 B class의 운영을 표현한 것이다.

- C class

C class는 Rx 가능 상태를 유지하기 때문에 타 class에 비해 최소 지연시간을 갖지만, 가장 많은 전력을 소비한다. 따라서 C class를 사용하기 위해서는 충분한 전력이 공급되는 상황을 고려해야 한다. 항상 Rx 가능 상태이기 때문에 LoRa를 이용한 스마트 플러그, 원격 제어 등 액츄에이터 구현에 적합한 class이다. 그림 4는 C class의 운영을 표현한 것이다.

본 실험에서는 산업 환경에서 충분한 전력이 공급되는 상황을 고려하여, C class로 동작하도록 프로그래밍 하였다.

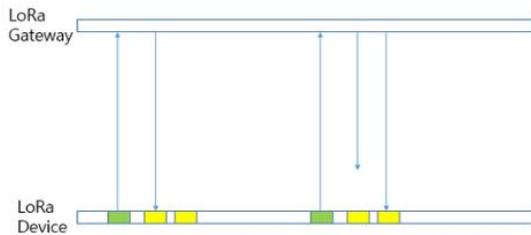


그림 2. LoRa Class A의 동작 방식  
Fig. 2. Behavior of LoRa class A.



그림 3. LoRa Class B의 동작 방식  
Fig. 3. Behavior of LoRa class B.

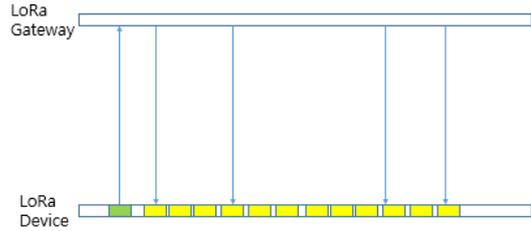


그림 4. LoRa Class C의 동작 방식  
Fig. 4. Behavior of LoRa class C.

건물 내부 실험은 한국기술교육대학교 1공학관에서 실험을 진행하였다. 데이터를 수집하는 게이트웨이의 역할을 하는 노드는 그림 건물 중간 복도 위 2 m 높이에 설치하였으며, 수신한 데이터를 저장하기 위해 노트북과 연결을 시킨 후 데이터 저장 프로그램과 연동을 시켰다.

데이터를 수집한 위치는 게이트웨이로부터 가장 먼 장소를 선택하여 각 층의 끝 모서리 지점에 배치한 후 총 100개의 데이터를 시퀀스 번호와 함께 수집하였다.

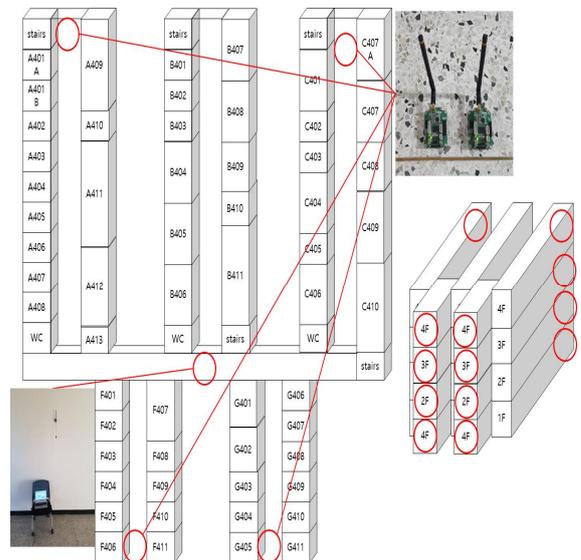


그림 5. 실험 건물 내부 구성도 및 모듈 배치 위치  
Fig. 5. Structure of the experimental building and location of module placement.

### IV. 성능 분석

그림 6은 4층에서 데이터를 수집한 결과이다. 꺾은선 그래프 중 위의 그래프가 신호대잡음비(SNR: signal to noise ratio)를 나타내며, 아래의 그래프가 수신신호세기(RSSI: receive signal strength indicator)를 나타내고, 막대그래프가 데이터 전송 오율을 나타낸 것이다. 동일한 층에서 실험한 결과 확산인자가 7일 때 신호 수신세기는 각 위치마다 평균 -78 dBm ~ -107 dBm으로 나타났으며, 신호대잡음비는 20 dB ~ 26 dB로 나타났다. 확산인자가 12일 때 수신신호세기는 각 위치마다 -81 dBm ~ -110 dBm, 신호대잡음비는 21 dB ~ 33 dB으로 SF7보다 낮은 수치를 보였지만, 데이터 전송 성공률은 SF7이 전체 적으로 평균 98%인 것에 비해 SF12는 99.75%로 매우 높은 것을 알 수 있다.

그림 7부터 9는 각각 3층 2층 1층에서 측정한 결과를 나타낸 그래프이다.

3층의 경우 확산인자가 7일 때 수신신호세기는 각 위치마다 평균 -82 dBm ~ -109 dBm으로 나타났으며, 신호대잡음비는 17 dB ~ 26 dB로 나타났다. 확산인자가 12일 때 수신신호세기는 각 위치마다 -86 dBm ~ -105 dBm, 신호대잡음비는 29 dB ~ 32 dB으로 신호 전달에 방해요소가 많아지며, 동일층 실험 결과와 비교했을 때 SF7 보다 적게 줄어들며, 안정적으로 신호가 전달되는 것을 알 수 있다. 또한 데이터 전송 성공률은 SF7이 전체 적으로 평균 98.25%이며, SF12는 99.5%로 SF7의 경우는 좋아졌지만, SF12는 약간 낮아진 것을 확인할 수 있다.

2층의 경우 확산인자가 7일 때 수신신호세기는 각 위치마다 평균 -92 dBm ~ -113 dBm으로 나타났으며, 신호대잡음비는 6 dB ~ 26 dB로 나타났다. 확산인자가 12일 때 수신신호세기는 각 위치마다 -92 dBm ~ -115 dBm, 신호대잡음비는 5 dB ~ 36 dB로 방해요소가 많아지며 확산인자가 높을수록 성능이 점차 비슷해지는 것을 알 수 있다. 특이한 점은 2층의 경우 데이터 전송 성공률은 확산인자가 7일 때 100%였으며, 확산인자가 12일 때 99.75%로 확산인자가 7일 때 모든 데이터가 오류 없이 전송된 것을 확인할 수 있다.

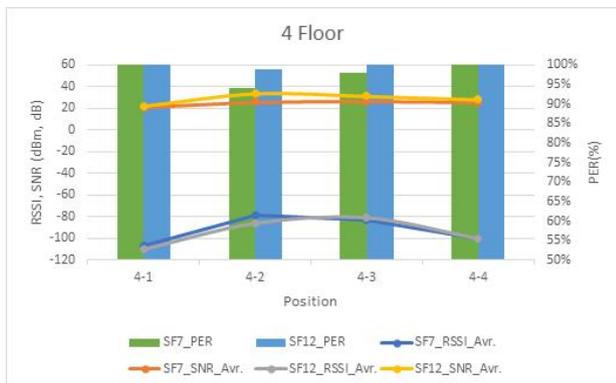


그림 6. 게이트웨이와 동일 층 실험 결과  
Fig. 6. The same floor experiment results as the gateway.

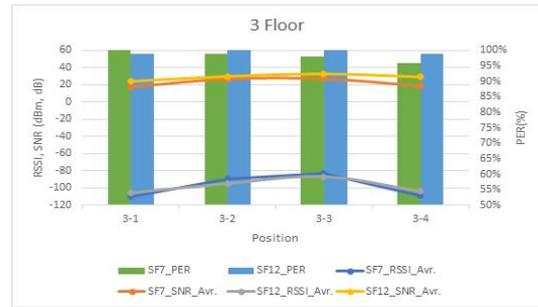


그림 7. 3층 실험 결과  
Fig. 7. 3rd floor experiment result.

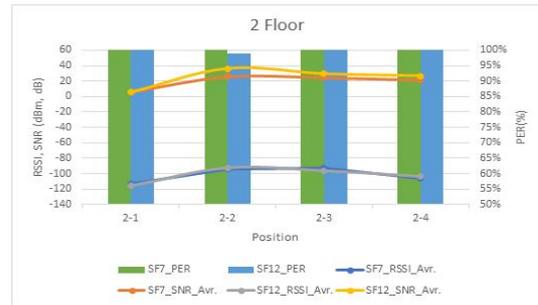


그림 8. 2층 실험 결과  
Fig. 8. 2nd floor experiment result.

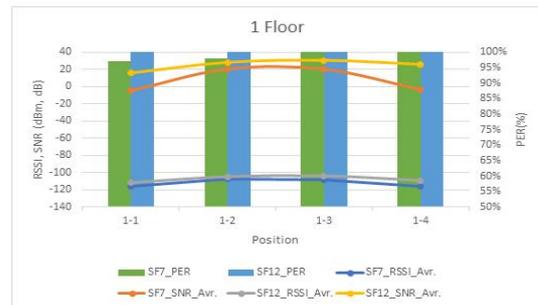


그림 9. 1층 실험 결과  
Fig. 9. 1st floor experiment result.

마지막으로 1층의 경우 확산인자가 7일 때 수신신호세기는 각 위치마다 평균 -107 dBm ~ -116 dBm으로 나타났으며, 신호대잡음비는 -4 dB ~ 20 dB로 나타났다. 확산인자가 12일 때 수신신호세기는 각 위치마다 -104 dBm ~ -111 dBm, 신호대잡음비는 16 dB ~ 30 dB으로 SF7보다 매우 높은 수치를 보이며, 데이터 성공률 역시 확산인자가 7일 경우 98.75%, 확산인자가 12일 경우 100%로 매우 높은 데이터 전송 성공률을 보였다.

Sx1276 데이터 시트에서 대단위 전송 모드로 대역폭이 125 KHz를 가지는 통신에서 확산인자가 7일 경우 최대 수신감도는 -123 dBm이며, 확산인자가 12일 때 -136 dBm으로 이번 실험을 통해 복잡한 구조를 가진 건물에서 확산인자가 7일 때와 12일 때 모두 4층 이상의 커버리지를 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 UHF 전파의 특성 상 거대한 공동이 존재하는 건물 내부 일 경우에는 가시거리를 가질 수 있기 때문에 더 넓은 커버리지

를 가질 수 있을 것으로 사료된다. 데이터 전송 성공률 또한 평균적으로 확산인자가 7일 때 98.75%였으며, 12일 때 99.75%로 산업현장 건물 내부에서 데이터 수신율이 극악하게 낮지 않으며, 매우 높은 수신 확률을 가지는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 산업현장에 LPWA를 적용하기 위해 개방형 표준을 사용하는 LoRa의 C class를 적용한 private LoRa 모듈을 개발하고 건물 내부에서 UHF 전파의 특성으로 인해 발생하는 손실을 극복하고 LPWA 통신을 건물 내부에 적용시키기 위한 통신 성능을 측정하는 연구를 진행하였다. 4층 높이 건물 내부에 게이트웨이의 역할을 수행하는 수신 모듈을 부착한 후 동일 층에서 가장 먼 4군데의 장소를 선정하여 각 층마다 데이터를 수집하고 정리한 후 데이터를 분석하였다. 실험결과 4층 높이의 건물에서는 벽과 계단, 유리 등의 방해물이 존재해도 1층 지역까지 모두 통신이 되는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 거리가 멀어질수록 확산인자가 낮을 때보다 높을 때 전파의 전달이 더 잘되는 것을 확인할 수 있었다. 향후 더 높은 건물에서의 실험을 통해 최대 도달 거리에 대한 실험과 전송 데이터 길이의 변화에 대한 실험을 진행하고 최종적으로 LPWA를 산업현장에 도입하기 위해 데이터 전송 속도를 높이는 방안으로 LoRa에서 반응속도가 빠른 Class C의 통신 방법을 개선하는 알고리즘을 설계하여 산업현장에 적용하기 위한 방안을 마련할 것이다.

## Acknowledgement

본 연구는 2018년도 한국기술교육대학교 교수교육연구진흥과제의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

## References

[1] G. Peralta, M. Iglesias-Urkia, M. Barcelo, R. Gomez, A. Moran, and J. Bilbao, "Fog computing based efficient IoT scheme for the Industry 4.0," in *Proceeding of 2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics(ECMSM)*, Donostia-San Sebastian: Spain, pp.1-6, 2017.

[2] C. Scheuermann, S. Verclas, and B. Bruegge, "Agile factory - An example of an Industry 4.0 manufacturing process," in *Proceeding of 2015 IEEE 3<sup>rd</sup> International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications*, Hong Kong: China, pp.43-47, 2015.

[3] X. Li, D. Li, J. Wan, A. V. Vasilakos, C. F. Lai, and S. Wang, "A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0," *Wireless Networks*, Vol. 23, No. 1, pp.23-41, 2017.

[4] R. S. Sinha, Y. Wei, and S. H. Hwang "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *Ict Express*, Vol. 3, No. 1, pp.14-21, 2017.

[5] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 19, No. 2, pp.855-873, 2017.

[6] P. Thubert, A. Pelov, and S. Krishnan, "Low-power wide-area networks at the IETF," *IEEE Communications Standards Magazine*, Vol. 1, No. 1, pp.76-79, 2017.

[7] C. S. Yoon, Performance Improvement of the UHF-Band RFID Reader System in Fading Channel Environments, M.S. dissertation, Hanyang University, Seoul, Korea, 2008.

[8] J. G. Lee and Y. S. Lee, "A study on the technology development of user-based home automation service," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 18, No. 3, pp.327-332, 2017.

[9] U. Noreen, A. Bounceur, and L. Clavier, "A study of LoRa low power and wide area network technology", in *Proceedings of the Advanced Technologies for Signal and Image Processing(ATSIP), 2017 International Conference*, Fez: Morocco, 2017.

[10] G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "A survey on 5G networks for the internet of things: communication technologies and challenges," *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 3619-3647, 2017.

[11] D. Ismail, M. Rahman, and A. Saifullah, "Low-power wide-area networks: opportunities, challenges, and directions," in *Proceedings of the 19th International Conference on Distributed Computing and Networking(ICDCN)*, Varanasi: India, 2018.

[12] SK Telecom 5G Tech Lab., Low power IoT LoRa device technical requirements, SK Telecom, Technical Requirements LoRa-1.8, July 2016..



**권혁 (Hyuk Kwon)**

1987년 11월 ~ 2016년 7월 : 삼성전자 반도체사업부 Test Engineer  
2003년 2월 : 호서대학교 전자공학과 (공학석사)  
2015년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과 박사과정  
2016년 10월 ~ 현재 : ADVANTEST 반도체 Tester  
※관심분야 : ASIC 설계, 광통신, 무선 네트워크, LPWA



**진경복 (Kyoung-Bog Jin)**

1985년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학사), 1987년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학석사)  
1999년 2월 : 한국과학기술원 (공학박사), 1987년 2월 ~ 2001년 1월 : 삼성전자(주) 기술연구소 수석연구원  
2001년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부 교수  
※관심분야 : 로봇 공학, 인간 컴퓨터 상호작용, 스마트 그리드, 가상현실, 머신 러닝



**오창현 (Chang-Heon Oh)**

1988년 2월 : 한국항공대학교 항공통신공학과 (공학사), 1990년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학석사)  
1990년 2월 ~ 1993년 8월 : 한진전자(주) 기술연구소 전임연구원, 1993년 10월 ~ 1999년 2월 : 삼성전자(주) CDMA 개발팀 선임연구원  
1996년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학박사), 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수  
2006년 8월 ~ 2007년 7월 : 방문교수(University of Wisconsin-Madison)  
※관심분야 : 무선/이동통신, IoT, 기계학습 기반 통신시스템