

LoS 및 NLoS 환경에서의 경로 손실을 고려한 LoRa의 모의실험 및 실측 결과 분석

이 동 희*, 김 석 찬^o

Analysis of Computer Simulated and Field Experimental Results of LoRa Considering Path Loss under LoS and NLoS Environment

Dong Hee Yi*, Suk Chan Kim^o

요 약

최근 사물인터넷 (IoT; Internet-of-things)의 필요성이 급격하게 대두됨에 따라 Low Power Wide Area (LPWA) 표준에 대한 관심이 커지고 있다. 이 논문에서는 LPWA의 표준 중의 하나인 LoRa 기술에 대한 성능을 실측 데이터에 기반하여 분석한다. 특히, Line-of-sight (LoS) 및 Non-line-of-Sight (NLoS) 환경에서 수신 신호의 Received Signal Strength Indication (RSSI) 값을 측정하여 이론적인 경로손실 모형을 적용한 RSSI 값과 비교한다. 이를 위해 다양한 경로손실 모형 중에서 Log-distance 및 Two-ray 모형 그리고 실측 데이터에 기반한 통계적 모형인 Okumura-Hata 모형을 적용한다. 그 결과, LoS 및 NLoS 환경 모두에서 Okumura-Hata 모형이 RSSI 실측 데이터와 가장 근접한 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 LoRa를 이용하여 네트워크를 구성할 때 최적의 노드 배치를 위한 기준을 제공하는데 활용될 수 있을 것이다.

Key Words : IoT, LPWA, LoRa, LoS, NLoS

ABSTRACT

Recently, a demand of Internet-of-things (IoT) rises dramatically and an interest in Low Power Wide Area (LPWA) grows larger accordingly. In this paper, performance in LoRa which is included in LPWA standard is analyzed. Particularly, after measuring Received Signal Strength Indication (RSSI) of received signal on Line-of-sight (LoS) and Non-line-of-sight (NLoS) environment and it is compared with RSSI which theoretical path loss model is applied to. Among many path loss models, the simulation for theoretical RSSI use Log-distance, Two-ray model and Okumura-Hata model that is based on the test database. Consequently, the result of Okumura-Hata model is the most similar with the measured RSSI. When a network based on LoRa is built, this result can be used to decide optimal node arrangement.

* 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

※ 본 논문은 BK21 플러스, IT기반 융합산업 창의인력양성사업단에 의하여 지원되었음.

♦ First Author : Pusan National University, Department of Electrical and Computer Engineering, ldh2717@pusan.ac.kr, 학생회원

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

논문번호 : KICS2017-01-021, Accepted January 17, 2017; Revised February 7, 2017; Accepted February 7, 2017

I. 서 론

최근 원격 모니터링 및 장비 자동 제어를 위해 사물인터넷 (IoT; Internet-of-things)을 여러 분야에서 적용하고 있는데^[1-3], 많은 무선통신 방식 중에 Bluetooth, Zigbee 등은 저전력의 무선통신 방식으로써 이미 가정용 및 산업용으로 많이 사용 중이기 때문에 IoT용도로 사용할 수 있다. 하지만 위 언급한 두 가지 통신방식은 통신 가능거리가 짧기 때문에 모니터링 범위가 넓은 경우에는 Mesh형태의 노드 배치로 중계를 하여야 한다. 따라서 센서 노드와 Gateway의 추가적인 설치가 수반되기 때문에 설치 및 관리 비용의 증가가 불가피하다. 이와 같은 단점을 극복하기 위해 최근 Low Power Wide Area (LPWA) 기술이 각광받고 있는데, 저전력 장거리 통신이 가능하여 광범위 센서 네트워크 구축이 가능한 것이 특징이다. 대표적인 기술로는 LoRa, Sigfox, LTE-M, NB-IoT 등이 있는데 현재 국내 시장에서 SKT는 LoRa와 LTE-M, KT는 LTE-M과 NB-IoT, LG U+는 NB-IoT 기반으로 전국망을 구축중이다.

국내 지형은 미국, 유럽 등의 지형과 달리 산이 많아 건물 높이뿐만 아니라 지대간 높이차가 심한 경우가 많다. 또한 좁은 도로를 따라 좌우로 건물이 빈틈없이 들어선 환경이 많으므로 Line-of-sight (LoS)가 잘 보장되지 않는다. 따라서 본 논문에서는 부산을 테스트 베드로 하여 LoS가 보장되는 해안가뿐만 아니라 Non-line-of-sight (NLoS) 환경인 도심 지역에서도 LoRa 성능을 측정하여 해당 환경의 이론값과 비교한다. 이번 장에서는 LoRa의 등장 배경을 언급하였고, 2장에서는 이론적 예상 성능을 도출하기 위해 Link Budget의 개념을 설명하고 분석에 사용한 경로 손실 모형을 소개한다. 3장에서는 LPWA의 정의 및 관련 기술을 간략히 소개하고 그 중 LoRa의 이점을 언급한다. 4장에서 측정 방법과 장소를 설명하고 실험 결과를 제시하고 분석한다. 마지막으로 5장에서는 연구 결과를 정리한다.

II. 경로 손실 모형

Link Budget은 전파가 송신 단에서 나와 채널을 거쳐 수신 단으로 갈 때까지 모든 과정에서 예상되는 이득, 손실의 합을 나타내는 용어인데, 이를 통해 수신기의 수신 전력 예측 모형을 만들 수 있다. 관계식은 아래와 같이 나타낸다^[4].

$$P_{RX}[dBm] = P_{TX} + G_{SYS} - L_{SYS} - L_{CH} - M \quad (1)$$

P_{RX} 는 수신기에서의 수신 전력, P_{TX} 는 송신기의 출력이다. G_{SYS} 는 송수신 시스템 내에서의 이득으로 안테나 이득이 이에 해당한다. L_{SYS} 는 송신 이전 및 수신 이후 시스템 내에서의 손실로 안테나 연결 케이블에서의 손실 등이 이에 해당한다. L_{CH} 는 채널 상에서 발생하는 손실로 경로 손실이 가장 대표적이다. 마지막으로 M 은 기타 요인으로 인한 손실로 편파 불일치로 인한 페이딩 등이 이에 해당한다^[4]. 이 논문에서는 안테나 이득과 경로 손실 외의 요인의 영향이 미약하기 때문에 이를 반영하여 수신 전력 모형을 간략화하였다. 이 때 채널상의 경로 손실을 PL_{CH} , 안테나 이득을 G_{ANT} 라고 하면 수신기의 수신 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{RX}[dBm] = P_{TX} + 2G_{ANT} - PL_{CH} \quad (2)$$

경로 손실은 크게 해석적 모형과 실측 모형으로 나눌 수 있는데, 이 장에서는 해석적 예측모형인 Log-distance 및 Two-ray 경로 손실 모형과 실측 모형인 Okumura-Hata 경로 손실 모형을 설명한다^[5].

2.1 Log-distance 경로 손실 모형

Log-distance 경로 손실 모형은 평균 수신 전력이 거리에 따라 대수적으로 감소한다고 가정하고 수신측의 수신 신호 전력을 예측하는 모형이다^[5]. $PL_{LD}(d)$ 을 송신부와 수신부의 거리가 d 일 때의 경로 손실이라 하고, $PL_F(d_0)$ 를 기준거리 d_0 만큼 떨어져 있을 때 자유 공간에서의 경로손실이라고 하자. 이 때 $PL_{LD}(d)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$PL_F(d_0)[dB] = 20\log(d_0) + 20\log(f) + 20\log\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (3)$$

$$PL_{LD}(d)[dB] = PL_F(d_0) + 10\gamma\log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (4)$$

표 1. 환경에 따른 경로손실 계수^[5]
Table 1. Path loss exponent according to environment

| Environment | Path Loss Exponent, γ |
|---------------|------------------------------|
| Free Space | 2 |
| Urban Area | 2.7 to 3.5 |
| Suburban Area | 3 to 5 |
| Indoor(LoS) | 1.6 to 1.8 |

식(4) 에서 경로 손실 정도를 뜻하는 계수 γ 는 환경에 따라 값을 다르게 설정할 수 있는데 기준은 다음과 같다.

2.2 Two-ray 경로 손실 모형

Two-ray 경로 손실 모형은 송신 안테나와 수신 안테나 사이에 평지가 존재한다고 가정할 때, LoS 경로를 따라 송신하는 신호 외에 바닥에 반사되어 수신 안테나로 향하는 다중경로 페이딩 신호가 있다고 보고 수신기의 수신 신호 전력을 예측하는 모형이다⁵⁾.

이 모형에서의 경로 손실은 송수신기 안테나의 높이와 둘 사이의 거리에만 의존한다. Two-ray 모형의 경로 손실 PL_{TR} 은 아래와 같이 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$PL_{TR}[dBm] = 20\log_{10}\left(\frac{d^2}{h_t h_r}\right) \quad (5)$$

2.3 Okumura-Hata 경로 손실 모형

Okumura-Hata 경로 손실 모형은 Log-distance, Two-ray와는 달리 실제 측정 데이터를 기반으로 만들어진 경험적인 모형으로, 도심 실측 경로 손실 모형인 Okumura 모형을 바탕으로 만들어졌다⁷⁾. 도심, 교외, 개방 공간 세 가지 환경에 따라 다른 모형을 적용할 수 있는데 송신 및 수신 안테나 높이를 각각 h_t 와 h_r , 주파수를 f , 송수신기 사이 거리를 d 라고 할 때 모형은 아래 식(11)과 같다⁸⁾.

$$A = 69.55 + 26.16\log_{10}f - 13.82\log_{10}h_t \quad (6)$$

$$B = 44.9 - 6.44\log_{10}h_t \quad (7)$$

$$C = 2(\log_{10}(f/28))^2 + 5.4 \quad (8)$$

$$D = 4.78(\log_{10}f)^2 + 18.33\log_{10}f + 40.94 \quad (9)$$

$$E = \begin{cases} \begin{cases} 3.2(\log_{10}(11.7554h_r))^2 - 4.97 & \text{(for large cities)} \\ (1.1\log_{10}f - 0.7)h_r - (1.56\log_{10}f - 0.8) & \text{(for small cities)} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

$$PL_{OH}[dBm] = \begin{cases} A + B\log d - E & \text{(Urban Area)} \\ A + B\log d - C & \text{(Suburban Area)} \\ A + B\log d - D & \text{(Open Area)} \end{cases} \quad (11)$$

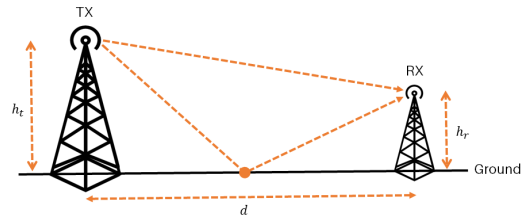


그림 1. Two-ray 경로 손실 모형
Fig. 1. Two-ray path loss model

III. LPWA 표준 및 LoRa 기술

LPWA는 Low Power Wide Area의 약어로서 저전력으로 장거리 통신이 가능한 기술을 뜻하는데 IoT분야에서 사용되는 기술 중 하나이다. 이 기술은 저전력 소모 설계, 저가 단말기 공급, 낮은 구축비용, 안정적 커버리지 제공, 대규모의 단말기 접속 구현 등이 핵심 요구조건이다. 대표적으로 비면허 대역 기반인 LoRa와 SigFox, 셀룰러망 기반의 LTE-M와 NB-IoT가 있다. LTE-M은 기존 셀룰러 망을 사용하되 3GPP의 LTE 표준에서 속도, 대역폭 등을 감소시켜 낮은 가격과 전력소모에 역점을 두어 개발된 표준이다. NB-IoT는 LTE-M에서 대역폭을 더 감소시켜 전력 효율을 증대시킨 표준이다. SigFox는 협대역 펄스에 의한 Ultra Narrow Band (UNB)표준을 기반으로 만들어진 기술로 2014년 8월 SigFox사에서 개발한 전용 표준이다. LoRa는 Semtech, Intel, Microchip 등으로 구성된 LoRa Alliance에서 발표한 표준으로써, IEEE 802.15.4g 기반의 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)와 Chirp Spread Spectrum (CSS)을 사용한 개방형 표준이다⁹⁾. LoRa의 핵심 기술 중 CSS는 [그림 2]와 같은 Chirp 펄스를 생성 및 송신하는 방법인데 CSS를 사용할 경우 상대적으로 대역폭이 넓어져서 도플러 효과나 잡음, 다중경로 페이딩 등에 강해진다. 또한 Chirp 펄스의 우수한 상관관계로 인해 송수신기 간의 시간 및 주파수 오프셋에 대한 허용치가 완

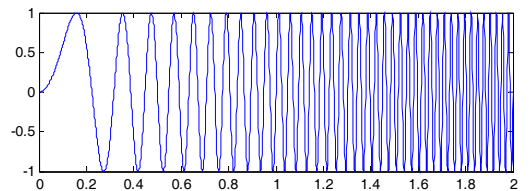


그림 2. Chirp Spread Spectrum에 사용되는 Chirp 신호의 예[10]
Fig. 2. Example of chirp signal used in chirp spread spectrum

화되기 때문에 수신기 구조가 비교적 간단하다^[4]. 이러한 장점들 때문에 이 논문에서는 LoRa의 성능을 분석하고자 한다.

위 언급한 특성은 셀룰러 망 대비 장치 가격 같은 비용 측면뿐만 아니라 수신 감도와 전력 소비 등 성능에서도 우위를 보인다. 또한 같은 비면허 대역 기반 기술인 SigFox는 저전력을 최우선 목표로 설계한 표준이므로 속도, 전송 데이터 크기 등이 매우 작게 제한되어 있다. 반면 LoRa는 개방형 표준으로 사용자 접근성이 높아 사용자의 임의대로 파라미터를 조절하여 채널환경에 따른 최적화가 가능하다. 예를 들어 고정된 대역폭에서 [표 2]에 제시된 SF (Spreading Factor)를 바꾸어 데이터 전송률 R_b 증가와 수신 감도 감소 혹은 그 반대로 변화하도록 할 수 있는데 BW를 대역폭, CR은 부호율이라고 할 때 SF와 R_b 관계는 식(12)와 같다^[4].

$$R_b[bps] = SF \times \frac{4 + CR}{2^{SF}} \times BW \quad (12)$$

LoRa 표준을 정의한 LoRa Alliance는 LoRaWAN이라는 표준 또한 정의하였다. 이는 LoRa로 LPWA 네트워크를 구성할 때의 통신 프로토콜과 네트워크 시스템 구조를 정의한 것인데, 각각의 다른 비면허 대역 주파수 (433MHz, 868MHz, 915MHz) 마다 DR (Data Rate) 모드를 정의한다. 각 모드는 SF, 대역폭이 정해져 있는데, SF는 7~12, 대역폭은 대부분 125kHz, 250kHz, 500kHz 중에 하나를 선택하도록 정해져 있다. CR은 4/5를 사용한다^[11].

표 2. LoRa 기술문서에 제시된 모드별 데이터 전송률과 신호감도
Table 2. Data rate and sensitivity on each mode indicated in LoRa technote

| Mode | Bit Rate(kb/s) | Sensitivity(dBm) |
|---------|----------------|------------------|
| SF = 7 | 5.468 | -123 |
| SF = 8 | 3.125 | -126 |
| SF = 9 | 1.757 | -129 |
| SF = 10 | 0.976 | -132 |
| SF = 11 | 0.537 | -134.5 |
| SF = 12 | 0.293 | -137 |

IV. 측정 및 분석

4.1 측정 장비 및 파라미터 설정

하드웨어는 Semtech의 SX1276MB1MAS LoRa

모듈과 ST의 Nucleo-L152RE MCU 2쌍을 각각 송수신기로 구성하여 1:1 통신으로 측정하였는데, LoRa 모듈의 주요 사양은 [표 3]과 같다. LoRa의 SF, 대역폭, 주파수 등의 설정은 미래창조과학부 무선설비규칙^[13]을 참조하였다. [표 4], [표 5]는 무선설비규칙에서 규정한 IoT망 용도로 허용된 채널 별 주파수와 각 채널에 허용된 출력이다. [표 5]에서 200mW 이하 출력은 실외 고정형 점대 다점 무선기기에만 해당하며 이는 AP (Gateway)를 지칭한다. 따라서 주파수는 25mW이하의 출력을 사용할 수 있는 26~32채널 중 26번 채널을 선택하였다. 대역폭은 LoRaWAN에서 주로 사용하는 125kHz, 250kHz, 500kHz 중에서 125kHz를 설정하였는데^[11], [표 4]의 허용된 채널 간격이 200kHz 미만이기 때문이다. CR은 4/5, 4/6, 4/7, 4/8 중 선택 가능하며 CR이 높을수록 많은 대역폭을 필요로 한다^[4]. 그런데 이전에 대역폭을 비교적 작은 값으로 설정하였으므로 네 가지 중 가장 낮은 4/5로 설정하였다. SF는 가장 작은 값과 가장 큰 값인 7과

표 3. SX1276MB1MAS 주요 사양[12]
Table 3. SX1276MB1MAS main specification

| Estimated Sensitivity | Maximum Power | Bandwidth | Frequency |
|-----------------------|---------------|---------------|----------------|
| -111 to -148dBm | 14dBm | 7.8 to 500kHz | 137 to 1020MHz |

표 4. 발사하는 전파에 허용되는 중심주파수
Table 4. Center frequency allowed for transmission

| 채널 | 주파수(MHz) | 채널 | 주파수(MHz) |
|----|----------|----|----------|
| 1 | 917.1 | 17 | 920.3 |
| 2 | 917.3 | 18 | 920.5 |
| 3 | 917.5 | 19 | 920.7 |
| 4 | 917.7 | 20 | 920.9 |
| 5 | 917.9 | 21 | 921.1 |
| 6 | 918.1 | 22 | 921.3 |
| 7 | 918.3 | 23 | 921.5 |
| 8 | 918.5 | 24 | 921.7 |
| 9 | 918.7 | 25 | 921.9 |
| 10 | 918.9 | 26 | 922.1 |
| 11 | 919.1 | 27 | 922.3 |
| 12 | 919.3 | 28 | 922.5 |
| 13 | 919.5 | 29 | 922.7 |
| 14 | 919.7 | 30 | 922.9 |
| 15 | 919.9 | 31 | 923.1 |
| 16 | 920.1 | 32 | 923.3 |

표 5. 각 채널별 출력 기준
Table 5. Maximum Power for each channel

| 채널 | 기준값 |
|--|-------------------------|
| 1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 18 | 3 mW 이하 |
| 2, 5, 8, 11, 14, 17, 19, 20~25 | 10 mW 이하 |
| 26~32 | 25 mW 이하 |
| 20~32 | 200 mW 이하 ¹⁾ |

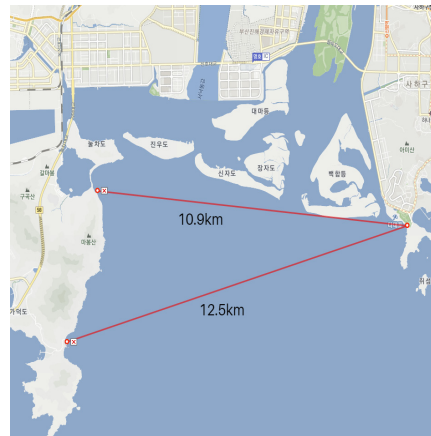
12, 두 모드에서 각각 측정하였다. 송신 출력은 SX1276MB1MAS 모듈의 최대출력인 14dBm (약 25mW)로 설정하였다. 이는 [표 5]에 제시된 것처럼 26번 채널의 최대 출력을 넘지 않기 때문에 문제가 되

지 않는다. 측정이 끝난 후에는 실제 측정된 Received Signal Strength Indication (RSSI)와 경로 손실 모형 기반의 이론적인 RSSI를 비교하기 위하여 식(2)를 이용하였는데 송신 출력 P_{TX} 는 SX1276MB1MAS의 최대 출력인 14dBm, 안테나 이득 G_{ANT} 은 -2.3dBi, 경로 손실 PL_{CH} 은 2장에서 소개한 세 가지 모형을 적용하였다. 따라서 이론적인 수신 전력을 P_{RX} 라고 할 때 수신 전력 예측 모형은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{RX}[dBm] = 14 + (-2.3) \times 2 - PL_{CH} = 10.4 - PL_{CH} \quad (13)$$



① 용호동-이기대-해운대



② 다대포-가덕도

그림 3. LoS 환경 측정 지점 ① 용호동-이기대-해운대 ② 다대포-가덕도

Fig. 3. Measurement path in LoS environment ① Yongho-dong, Igidae, Haundae ② Dadaepo, Gaduk-do

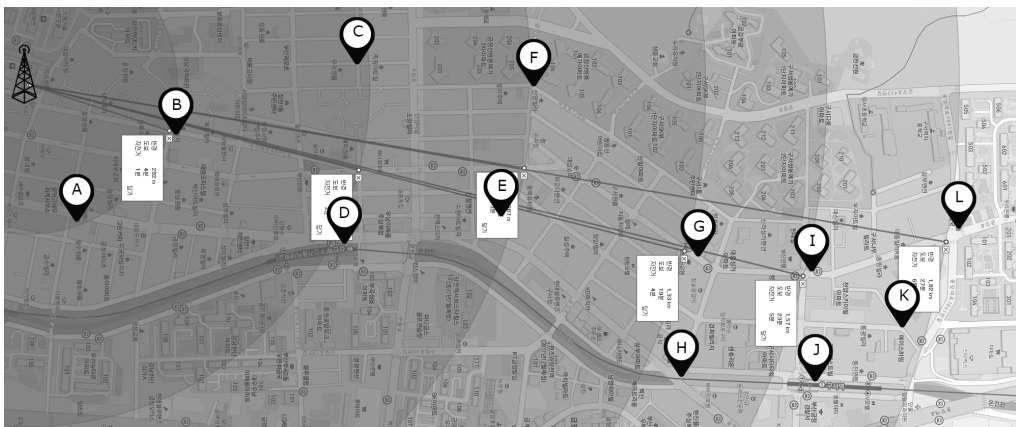


그림 4. NLoS 환경에서의 측정 환경 설정 및 지점

Fig. 4. Ranges and points of measurement on NLoS environment

1) 실외 고정형 점대다점(Point-to-multipoint) 무선기기에 한함

4.2 측정 장소 선정

LoS 환경에서의 측정은 부산광역시 해안가 지역에서 진행하였다. 한 지점이 고정된 상태에서 1km씩 간격을 증가시키며 측정하기는 어려워 두 개의 LoRa 모델이 같이 이동하면서 측정하였다. NLoS 환경에서의 측정은 부산광역시 금정구 구서동, 장전동 일대에서 진행하였다. 위치가 고정된 모듈은 부산대학교 제 9공학관 옥상에서 장전동 주택가 방향의 난간에 설치하고, 측정 지점은 다음과 같은 기준으로 선정하였다.

- (1) 고정 설치된 LoRa 통신모듈로부터 200m ~ 300m 씩 점차적으로 멀어지면서 측정 반경을 설정
- (2) 각각의 측정 반경선 주위에서 주변 환경이 다른 두 지점을 선택하여 측정

4.3 측정 결과의 비교 및 분석

LoS 환경에서 측정한 데이터와 경로손실 모형을 비교한 그래프는 [그림 5]에 나타내었다. 우선 Log-distance 모형에서 경로손실계수 γ 를 2로 하여 자유 공간 경로손실 모형으로 가정하고 비교한 결과 약 25dB의 차이를 보인다. Two-ray 모형은 송신 및 수신 안테나 높이를 각각 20m와 1m로 가정했을 때 실측 데이터와 약 5~10dB의 차이로 Log-distance 모형 대비 실측치와 더 가까워짐을 알 수 있다. 그리고 Okumura-Hata 모형 세 가지 중 Open Area 모형은 Two-ray 모형과 송신 및 수신 안테나 높이를 동일하게 가정하고 비교 시 전반적으로 실측치에 가장 근접함을 알 수 있다. 결과적으로 세 가지 모형 중 Okumura-Hata 모형이 실측 데이터와 가장 흡사하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과의 원인을 살펴보면 첫 번째로 Log-distance 모형은 거리에 따른 손실과 환경에 따른 경로 손실만을 반영하였기 때문에 바다 표면 반사에 의한 다중경로 페이딩 등을 반영하지 못한다. 두 번째로, Two-ray 모형은 다중경로 페이딩은 반영하지만 송수신기 주변의 도심 혹은 부도심이기 때문에 일어나는 간섭은 반영하지 못한다⁵⁾. 마지막으로 Okumura-Hata 모형은 실제 도심, 교외 측정 데이터를 반영한 Okumura 모형을 바탕으로 만들어 졌기 때문에 송수신기 주변의 간섭을 잘 반영한다⁷⁾. 그리고 [표 6]과 [표 7]의 PER (Packet Error Rate)을 살펴보았을 때, LoS에서의 안정적인 통신을 위한 범위는 약 9km로 추정된다.

NLoS 환경에서 측정한 데이터를 경로손실 모형과 비교한 그래프는 [그림 6]에 나타내었다. 우선 NLoS 환경에서 바다 반사는 영향이 미미하므로 Two-ray 모

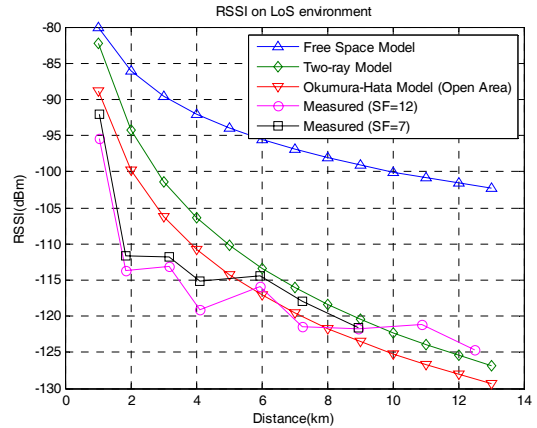


그림 5. LoS 환경에서의 RSSI
Fig. 5. RSSI on LoS environment

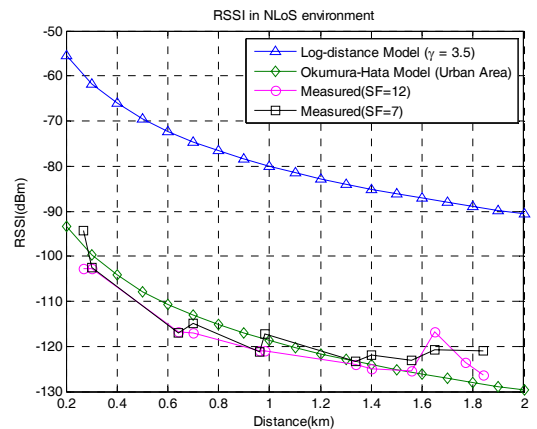


그림 6. NLoS 환경에서의 RSSI
Fig. 6. RSSI on NLoS environment

형은 비교에서 제외하였다. 구서동, 장전동은 주택, 상가 등 장애물이 존재하는 전형적인 도심 환경이므로 Log-distance 모형은 [표 1]를 참조하여 경로손실계수 γ 에 3.5를 적용하였고, Okumura-Hata 모형은 세 가지 중에서 Urban Area 모형을 적용하였는데 송수신 안테나의 높이는 LoS 환경 측정에서 사용한 경로 손실 모형에서의 높이와 동일하다. 그 결과 Log-distance 모형은 실측치와 약 30dBm의 차이를 보이는 반면에 Okumura-Hata 모형은 실제 측정된 RSSI와 흡사한 수치임을 확인하였다. [그림 6]의 결과에 대한 이유는 [그림 5]와 함께 언급했던 분석과 동일하다.

측정 결과를 종합적으로 정리하면 [그림 5], [그림 6]을 통해 도심 측정 모형인 Okumura-Hata 모형이 가장 흡사하고 예측에 적합한 모형이라는 것을 확인할 수 있다. 그리고 [표 8]과 [표 9]의 I, J, K, L 지점

표 6. LoS환경에서의 측정치 (SF = 7, Bandwidth = 125kHz, CR = 4/5)
 Table 6. Measurement on LoS environment (SF = 7, Bandwidth = 125kHz, CR = 4/5)

| Path | Distance (km) | Packet | | | | RSSI Mean (dBm) | SNR Mean (dB) |
|------|---------------|--------|----------|-------|--------|-----------------|---------------|
| | | Sent | Received | Valid | PER(%) | | |
| A | 1.07 | 500 | 500 | 499 | 0.20 | -92.0 | 25.0 |
| B | 1.84 | 500 | 500 | 494 | 1.20 | -111.6 | 10.8 |
| C | 3.18 | 500 | 494 | 488 | 1.21 | -111.8 | 11.5 |
| D | 4.1 | 500 | 497 | 400 | 19.52 | -115.2 | -14.3 |
| E | 5.96 | 500 | 499 | 457 | 8.42 | -114.4 | -20.0 |
| F | 7.25 | 500 | 494 | 482 | 2.43 | -117.9 | -5.5 |
| G | 8.96 | 500 | 496 | 479 | 3.43 | -121.6 | -16.6 |
| H | 10.9 | 50 | 4 | 0 | 100.00 | N/A | N/A |
| I | 12.5 | 50 | 8 | 0 | 100.00 | N/A | N/A |

표 7. LoS환경에서의 측정치 (SF = 12, Bandwidth = 125kHz, CR = 4/5)
 Table 7. Measurement on LoS environment (SF = 12, Bandwidth = 125kHz, CR = 4/5)

| Path | Distance (km) | Packet | | | | RSSI Mean (dBm) | SNR Mean (dB) |
|------|---------------|--------|----------|-------|--------|-----------------|---------------|
| | | Sent | Received | Valid | PER(%) | | |
| A | 1.07 | 500 | 500 | 500 | 0.00 | -95.4 | 26.5 |
| B | 1.84 | 500 | 500 | 499 | 0.20 | -113.7 | 9.1 |
| C | 3.18 | 500 | 500 | 500 | 0.00 | -113.2 | 17.2 |
| D | 4.1 | 500 | 500 | 498 | 0.40 | -119.1 | -22.5 |
| E | 5.96 | 500 | 498 | 498 | 0.00 | -116.0 | -13.8 |
| F | 7.25 | 500 | 495 | 492 | 0.61 | -121.4 | -7.7 |
| G | 8.96 | 500 | 499 | 499 | 0.00 | -121.7 | -8.8 |
| H | 10.9 | 500 | 430 | 388 | 9.77 | -121.2 | -64.9 |
| I | 12.5 | 823 | 396 | 223 | 43.69 | -124.7 | -72.9 |

표 8. NLoS환경에서의 측정치 (SF = 7, Bandwidth = 125kHz, CR = 4/5)
 Table 8. Measurement on NLoS environment (SF = 7, Bandwidth = 125kHz, CR = 4/5)

| Point | Distance (km) | Packet | | | | RSSI Mean (dBm) | SNR Mean (dB) |
|-------|---------------|--------|----------|-------|--------|-----------------|---------------|
| | | Sent | Received | Valid | PER(%) | | |
| A | 0.27 | 500 | 500 | 435 | 13.00 | -94.3 | 19.9 |
| B | 0.3 | 580 | 572 | 449 | 21.50 | -102.6 | -12.4 |
| C | 0.64 | 500 | 490 | 318 | 35.10 | -117.1 | -8.1 |
| D | 0.7 | 624 | 616 | 391 | 36.53 | -115.0 | 1.7 |
| E | 0.96 | 206 | 146 | 41 | 71.92 | -121.3 | -28.1 |
| F | 0.98 | 302 | 301 | 205 | 31.89 | -117.2 | -5.0 |
| G | 1.34 | 500 | 468 | 344 | 26.50 | -123.4 | -19.8 |
| H | 1.4 | 100 | 65 | 1 | 98.46 | -122.0 | -31.0 |
| I | 1.56 | 100 | 66 | 1 | 98.49 | -123.0 | -35.0 |
| J | 1.62 | 220 | 141 | 31 | 78.01 | -120.8 | -31.2 |
| K | 1.8 | 100 | 56 | 0 | 100.00 | N/A | N/A |
| L | 1.84 | 100 | 86 | 5 | 94.19 | -121.0 | -28.0 |

표 9. NLoS 환경에서의 측정치 (SF = 12, Bandwidth = 125kHz, CR = 4/5)
 Table 9. Measurement on NLoS environment (SF = 12, Bandwidth = 125kHz, CR = 4/5)

| Point | Distance (km) | Packet | | | | RSSI Mean (dBm) | SNR Mean (dB) |
|-------|---------------|--------|----------|-------|--------|-----------------|---------------|
| | | Sent | Received | Valid | PER(%) | | |
| A | 0.27 | 500 | 500 | 500 | 0.00 | -102.7 | 23.7 |
| B | 0.3 | 500 | 500 | 500 | 0.00 | -102.8 | -5.6 |
| C | 0.64 | 500 | 371 | 371 | 0.00 | -116.8 | -0.4 |
| D | 0.7 | 500 | 406 | 406 | 0.00 | -117.1 | 10.3 |
| E | 0.96 | 500 | 483 | 481 | 0.41 | -121.1 | -36.6 |
| F | 0.98 | 500 | 489 | 487 | 0.41 | -121.0 | -12.4 |
| G | 1.34 | 1000 | 753 | 753 | 0.00 | -124.1 | -15.1 |
| H | 1.4 | 500 | 91 | 91 | 0.00 | -125.0 | -49.7 |
| I | 1.56 | 500 | 450 | 449 | 0.22 | -125.4 | -36.8 |
| J | 1.62 | 500 | 490 | 490 | 0.00 | -116.7 | -11.4 |
| K | 1.8 | 500 | 410 | 410 | 0.00 | -123.6 | -23.2 |
| L | 1.84 | 500 | 264 | 256 | 3.03 | -126.3 | -54.2 |

을 보면 비슷한 SNR임에도 불구하고 PER이 SF가 12일 때 훨씬 낮음을 볼 수 있다. 여기서 Spreading Spectrum 으로 인한 확산이득 G_p 의 특성과 SF와의 관계를 확인할 수 있는데, R_c 는 Chip Rate, R_b 는 Bit Rate라고 할 때 관계식은

$$G_p = 10 \log_{10} \left(\frac{R_c}{R_b} \right) \quad (14)$$

으로 나타낼 수 있다⁴⁾. 여기서 SF가 증가하면 R_c 의 증가, R_b 의 감소로 G_p 가 증가함으로써 낮은 SNR에도 PER과 Timeout이 감소하게 되고 SF가 7보다 12일 때 성능이 좋다는 것을 이론적으로도 확인이 가능하다.

V. 결 론

이 논문에서는 거리에 따른 LoRa의 성능 변화를 LoS 및 NLoS 환경에서 측정하여 경로손실 모형을 통해 산출한 RSSI 이론값과 비교하였다. 그 결과 도심에서 측정한 자료를 통계적으로 모형화한 Okumura-Hata 모형이 실제 도심 측정값과 가장 유사하였고, SF의 차이에 따른 성능 차이 또한 확인하였다. 거기에 LoRa 성능에 대한 실측 데이터 연구는 유럽지역에 편중되어 있는 경향이 있는데 이와 같은 결과는 국내 도심 형태에서 측정한 것이기에 한국형 LoRa IoT 네트워크 구현에 있어서 보다 더 의의가 있

다고 볼 수 있다. 그리고 LoS 측정 테스트 베드가 부산시였기 때문에 일반 도심지뿐만이 아니라 부산항만 시설 및 해안 관광지 등에서 측정이 가능했다. 따라서 해양에 특화된 모니터링용 LoRa 기반 IoT망 구축 시 최적화 된 노드 배치를 위한 기반 데이터로도 활용 가능하다. 또한 향후 도시의 음영지역을 보완하기 위한 중계기능이 추가될 것이다. 이렇게 중계기를 사용하면 망 전체 소비 전력은 필연적으로 증가할 것이기 때문에 중계 경로 내 노드에 대한 성능 및 전력 효율을 분석하는 연구가 병행되어야 할 것이다.

References

- [1] C.-S. Oh, et al., "Indoor air quality monitoring systems in the IoT environment," *J. KICS*, vol. 40, no. 5, pp. 886-891, May 2015.
- [2] S. B. Lee, et al., "A study on the development of platform based on IoT," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 1059-1061. Jeju Island, Korea, Jun. 2016.
- [3] J. Park, "Technology and Issue on embodiment of smart factory in small-medium manufacturing business," *J. KICS*, vol. 40, no. 12, pp. 2491-2502, Dec. 2015.
- [4] Semtech Corporation, *LoRa™ Modulation Basics*(2015), Retrieved Dec. 20, 2016, from <http://www.semtech.com>.
- [5] Andrea Goldsmith, *Wireless communications*,

Cambridge, 2004.

- [6] M. Bae, et al., "Measurement and analysis of LOS-based path loss in urban wireless sensor network environments," *J. KISS : Inf. Netw.*, vol. 38, no. 5, pp. 411-416, Oct. 2011.
- [7] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-29, no. 3, pp. 317-325. Aug. 1980.
- [8] Sylvain Ranvier, *Path Loss Models*(2004), Retrieved from <http://www.comlab.hut.fi>.
- [9] S. Y. Kim, et al., "Wide range IoT technology and standardization based on LPWA," *Electron. Telecommun. Trends*, vol. 31, no. 2, pp. 95-106, Apr. 2016.
- [10] A. Springer, et al., "Spread spectrum communications using chirp signals," *IEEE/AFCEA EUROCOMM 2000, Inf. Syst. Enhanced Public Safety and Security*, pp. 166-170, May 2000.xs
- [11] LoRa Alliance, *LoRaWAN Specification* (2015), Retrieved Dec. 26, 2016, from <https://www.lora-alliance.org>.
- [12] Semtech Cooperation, *SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver*(2015), Retrieved Dec. 20, 2016, from <http://www.semtech.com>.
- [13] Ministry of Science, ICT and Future Planning, *Rules on Radio Equipment*(2015), Retrieved Dec. 20, 2016, from <http://www.msip.go.kr>.
- [14] W. C. Huffman and V. Pless, *Fundamentals of Error-Correcting Codes*, Cambridge, 2003.

이 동 희 (Dong Hee Yi)



2015년 8월 : 부산대학교 전자
전기공학부 졸업
2015년 9월~현재 : 부산대학교
전기전자컴퓨터공학과 석사
과정
<관심분야> 사물인터넷, 초음
파통신, 센서 네트워크

김 석 찬 (Suk Chan Kim)



1993년 2월 : 부산대학교 전자공
학과 졸업
2000년 2월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 석사 및 박
사
2002년 3월~현재 : 부산대학교
전자공학과 교수

<관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 수중통신, 사물인
터넷