

## IoT 무선 네트워크 설계를 위한 BLE 시스템의 성능 분석

# Performance Analysis of BLE System for Wireless IoT Network Design

노재성

서울대학교 정보통신공학과

Jae-sung Roh

Department of Information & Communication Engineering, Seoul University, Seoul 02192, Korea

### [요 약]

최근 IoT(Internet of Things)의 급속한 성장은 저 전력 무선 기술의 확산으로 이어지고 있다. IoT 무선 네트워크 설계의 주요 과제는 2.4 [GHz] ISM(Industrial Scientific Medical) 주파수 대역을 공유하는 서로 다른 무선 기술 간의 공존을 달성하는 것이다. 따라서 무선 네트워크의 신뢰성 향상과 무선 네트워크 사이의 공존 운용을 위한 연구가 필요하다. 특히, 다양한 산업 분야에서 장치 간의 연결 매체로 많은 활용이 예상되는 BLE(Bluetooth Low Energy) 무선 네트워크 환경에서 상호 서비스 공존을 위한 간섭 모델 및 성능에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 주거 및 산업용 무선 응용 분야에서 널리 사용되는 BLE 시스템의 물리적 계층을 중심으로 IEEE 802.15.4 시스템과의 동일채널간섭 모델을 설정하고 동일채널간섭 환경에서 BLE 무선 통신 시스템의 성능을 분석한다. 분석 결과, 잡음과 동일채널간섭이 존재하는 환경에서 간섭원과 BLE 시스템 사이의 거리가 증가함에 따라서 동일채널간섭의 양이 감소하여 BLE 시스템의 오율 성능은 개선됨을 알 수 있었다.

### [Abstract]

The recent rapid growth of the IoT(Internet of Things) is leading to the spread of low-power wireless technology. A major challenge in designing IoT wireless networks is to achieve coexistence between different wireless technologies that share the 2.4 [GHz] ISM (Industrial Scientific Medical) frequency band. Therefore, there is a need for research on improving the reliability of wireless networks and coexisting operation between wireless networks. In particular, it is necessary to study an interference model and performance for mutual service coexistence in a BLE (Bluetooth Low Energy) wireless network environment, which is expected to be widely used as a connection medium between devices in various industrial fields. In this paper, the co-channel interference model with the IEEE 802.15.4 system is established focusing on the physical layer of the BLE system widely used in residential and industrial wireless applications, and the performance of the BLE wireless communication system is analyzed in the co-channel interference environment. As a result of the analysis, as the distance between the interference source and the BLE system increases in an environment where noise and co-channel interference exist, the amount of co-channel interference decreases and the error rate performance of the BLE system improves.

**Key word** : BLE system, Coexistence performance, Interference model, IoT wireless network, ISM band.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2022.26.6.481>



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 8 November 2022; Revised 1 December 2022

Accepted (Publication) 16 December 2022 (30 December 2022)

Corresponding Author; Jae-sung Roh

Tel: +82-2+490+7206

E-mail: [jsroh@seoil.ac.kr](mailto:jsroh@seoil.ac.kr)

## 1. 서론

최근 IoT(Internet of Things)의 출현으로 스마트 무선 장치의 수가 폭발적으로 증가하고 있으며 IoT 응용 서비스에 따른 고유한 서비스 품질의 요구 사항이 제시되고 있다. 이에 따라 IEEE 802.15.4나 BLE(Bluetooth Low Energy)기술표준에서는 다양한 저 전력 무선 기술이 개발되고 있다. 세계적으로 허용되어 운영 중인 주파수 대역은 2.4[GHz] ISM(Industrial Scientific Medical) 주파수 대역이며 IEEE 802.11과 같은 무선 인터넷 기술에서도 함께 사용되고 있다 [1]-[3].

많은 센서 장치와 무선 기술의 사용으로 무선 IoT 서비스가 지속적으로 증가하고 있으며 다양한 스마트 센서 장치는 스마트 공장 및 가정, 환경 모니터링, 스마트 교통, 의료 응용과 같은 분야에서 사용되고 있다. 또한, WBAN(Wireless body area network) 분야에서는 병원이나 가정에서 운영되는 스마트 헬스케어, 스포츠 및 피트니스 활동 영역에 적용되고 있다. WBAN에서 사용되는 다양한 센서는 인터넷에 연결할 수도 있으며 비즈니스 측면에서 관심이 증가하고 있는 무선 IoT 서비스 사례가 되고 있다. 대부분의 무선 IoT 서비스는 배터리 교체 없이 센서 노드의 긴 수명을 요구하며 작동 환경에서 제한된 에너지만 사용하기 때문에 저 전력 무선 통신 기술이 필요하게 된다. 이러한 저 전력 무선 통신 서비스 제공을 위해 제안된 저 전력 통신 기술은 BLE, IEEE 802.15.4 등이 있으며 BLE는 상업적으로 다양한 분야에서 가장 널리 사용되고 있다. BLE는 Bluetooth SIG(Special Interest Group)에서 개발한 기술로써 시장에 널리 보급된 많은 무선 기술에 대한 최상의 대안이 되고 있다. BLE는 현재 노트북, 태블릿, 스마트폰에서 사용이 가능하며 우수한 성능과 많은 보급으로 인해 무선 표준 기술로 진화하고 있다 [4],[5].

BLE 통신 기술은 산업, 과학, 의료분야의 2.4 [GHz] 주파수 대역에서 전 세계적으로 사용이 가능하기 때문에 다양한 지역에서 상호 운용이 가능한 특징을 가져야 한다. 하지만 해당 주파수 대역에서 작동하는 무선 통신 장치의 수가 급격히 증가하게 된다면 무선 통신 네트워크 사이의 간섭 문제가 발생하게 된다. 특히 의료 분야의 경우에는 안정적이고 신뢰성이 있는 통신이 필요하기 때문에 2.4 [GHz] ISM 주파수 대역의 혼잡 서비스 환경에서 무선 통신 네트워크의 성능을 평가하는 것이 중요한 요인이 되고 있다. 여러 종류의 무선 통신 시스템이 2.4 [GHz] ISM 주파수 대역에서 집중적으로 사용됨으로써 이러한 주파수 대역에서 작동하는 무선 통신 네트워크 영역에서 동일채널 간섭이 증가하고 있는 상태이다 [6]-[9].

무선 통신 네트워크에 영향을 미치는 간섭원은 일반적으로 지능형 및 비 지능형의 두 가지로 분류할 수 있다. 지능형 간섭원은 다른 무선 통신 시스템에서 발생하며 간섭 모델은 일반적으로 분석 방법을 사용하여 해석되고 있다. 예를 들어, [5]에서는 IEEE 802.11b 간섭 하에서 블루투스의 성능을 평가하였고 두 시스템 간의 패킷 충돌 확률을 도출하기 위해 물리 계층 및

매체 접근 제어 계층의 매개변수와 전파 조건을 사용하여 지능형 간섭원의 모델링을 해석하였다. 비 지능형 간섭원은 일반적으로 의도하지 않은 전자기 방출로 인해 발생하며 측정 데이터를 기반으로 간섭원이 모델링되고 특성화된다. 예를 들어, [8]에서는 전자 장치로 인한 충격 간섭을 경험적으로 모델링하기 위해 피크 진폭, 펄스 지속 시간, 간섭의 도착 시간에 대한 통계 데이터와 광범위한 측정 데이터를 사용하여 간섭원의 모델링을 해석하였다.

BLE는 우수한 성능, 낮은 에너지 소비 및 광범위한 확산을 결합한 무선 네트워크 기술이다. 본 논문에서는 BLE의 전송 방식, BLE 서비스 및 특성을 분석한다. 그리고 BLE 시스템의 성능을 간섭의 영향 측면에서 분석하기 위하여 간섭원으로는 IEEE 802.15.4 무선 네트워크를 대상으로 선정하고 BLE 통신 시스템의 성능을 분석한다. 또한 시스템에 영향을 주는 동일채널간섭을 모델링하고 신호 및 간섭의 전송 전력과 채널의 경로 손실 모델을 사용하여 BLE 수신기에서 신호 전력 대 간섭 전력 비를 계산한다. 물리 계층 모델은 연속적으로 발생하는 동일채널간섭을 가정하여 BLE 수신기에서 신호 전력 대 간섭 전력 비의 함수로 BLE 통신 시스템의 성능을 비교 분석한다.

## II. BLE 기술 규격 및 서비스

BLE는 Bluetooth Smart 라고도 부르며 연결형 웨어러블, 스마트 가전 제품, 근접 태그를 구현하는 핵심 요소 기술이다. BLE는 단거리 무선 통신의 표준 기술로 적은 양의 데이터를 짧은 대기 시간으로 전송하고 빠른 연결을 통해 전력 소비를 줄이도록 설계되어 있다. BLE는 Classic Bluetooth 연결에 비해 약 1/10 이하에 불과한 전력을 소비하며 1[Mbps]의 링크 비트 전송률과 200[Kbps]의 애플리케이션 처리량을 사용하여 스마트 워치, 손목 밴드, 웨어러블 디바이스 설계 및 광범위한 IoT 응용 분야에 사용되고 있다. 그림 1은 Classic 블루투스 와 BLE의 응용 사례를 비교하고 있다. BLE는 Classic 블루투스를 대체하지 않으며 각 기술은 고유의 시장과 응용 서비스를 지원한다. BLE와 Classic 블루투스는 데이터의 전송 방식에 차이점이 있으며 Classic 블루투스는 장치 사이의 페어링을 필요로 하나 BLE는 장치 사이의 페어링을 필요로 하지 않는 특징을 가진다.

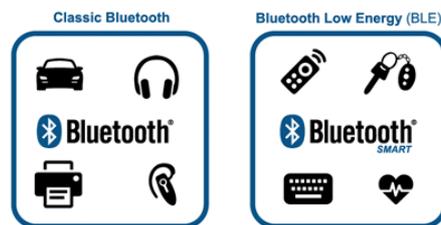


그림 1. Classic 블루투스와 BLE의 응용 사례 비교  
Fig. 1. Comparison of classic Bluetooth and BLE application cases.

표 1. 블루투스과 BLE의 기술 규격

Table 1. Technical specifications of classic Bluetooth and BLE.

Technical specification	Classic Bluetooth	BLE
Frequency	2.4 [GHz]	2.4 [GHz]
Modulation	GFSK, DPSK(EDR)	GFSK
Distance	10-100 [m]	Max ~50 [m]
Data rate	1-3 [Mbps]	1 [Mbps]
Throughput	0.7-2.1 [Mbps]	0.2 [Mbps]
Active slaves	7	Not defined
Robustness	Adaptive fast freq. hopping, FEC, fast ACK	Adaptive freq. hopping, 24-bit CRC, Lazy ACK
Latency	100 [ms]	3 [ms]
Network topology	Scatternet	Star bus
Power consumption	1 [Watt]	0.01-0.5 [Watt]
Peak current consumption	<30 [mA]	<15 [mA]

표 1에서는 Classic 블루투스과 BLE의 기술 규격을 비교하고 있다. Classic 블루투스는 많은 양의 데이터를 교환할 수 있기 때문에 전화 이어폰, 게임 컨트롤러, 무선 키보드, 프린터와 같은 연속 스트리밍 데이터 응용에 이상적이다. 반면 BLE는 소량의 데이터를 일시적 또는 주기적으로 전송하는 서비스에 최적화되어 있기 때문에 BLE의 전력 사용은 매우 효율적이며 소형 배터리를 사용하는 서비스에 이상적이다. 실제로 BLE 지원 장치는 수년 동안 코인 셀 배터리로 작동할 수 있으며 BLE에 적합한 장치로는 데이터 로거, 심박수 및 혈압 모니터 등이 있다.

### III. 간섭 환경에서 BLE 시스템의 성능 분석

#### 3-1 간섭 환경 모델

BLE 시스템과 동일한 주파수 대역을 사용하는 시스템과의 공존 성능을 동일채널간섭 측면에서 분석하기 위하여 무선 네트워크의 거리에 따른 경로 손실 모델을 사용한다. BLE 시스템의 공존 성능을 분석하기 위하여 무선 통신을 희망하는 시스템의 신호원은 BLE 신호이고 동일채널간섭으로 작용하는 무선 통신 시스템은 IEEE 802.15.4 시스템을 대상으로 한다. 또한 신호원 및 동일채널간섭원의 전송 전력과 네트워크 구조를 반영하고 거리에 따른 무선 채널의 경로 손실 모델을 사용하여 BLE 수신기에서 신호 전력 대 간섭 전력 비를 계산한다. 물리 계층

에서는 연속적으로 발생하는 IEEE 802.15.4 동일채널간섭을 가정하여 BLE 시스템의 수신부에서 신호 대 간섭 전력비의 함수로 BLE 시스템의 성능을 분석한다.

그림 2는 BLE 시스템과 IEEE 802.15.4 시스템의 공존 성능을 분석하기 위한 간섭 모델을 나타낸다. BLE 시스템 및 IEEE 802.15.4 시스템의 노드 위치를 통하여 두 시스템의 공존 성능을 분석하며 간섭 모델에서 좌표 (0, 0)에는 BLE 시스템의 수신기 노드, 좌표 (-D,0)에는 BLE 시스템의 송신기 노드, 좌표 (d, 0)에는 IEEE 802.15.4 시스템의 동일채널간섭 노드가 위치한다고 가정한다. 해석을 위하여 간섭 모델에서 각 네트워크는 두 개의 노드로 구성되며 하나의 IEEE 802.15.4 노드가 BLE 노드 근처에 있다고 가정한다. 따라서 BLE 시스템에서는 IEEE 802.15.4 시스템에서 발생하는 동일채널간섭의 영향만을 받게 된다.

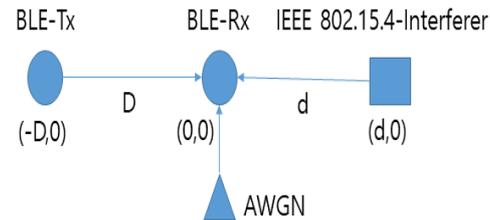


그림 2. BLE 시스템의 간섭 모델  
Fig. 2. Interference model of BLE system.

간섭 모델에서 통신 거리의 변화는 경로 손실 모델을 사용하여 신호의 감쇠로 변환된다. 경로 손실 모델은 사용되는 주파수 대역과 네트워크가 작동하는 서비스 환경에 따라 선택된다. 본 연구에서는 2.4 [GHz] 대역의 실내 환경에서 권장하는 경로 손실 모델을 사용하여 경로 손실을 모델링하였다. 그림 3의 경로 손실 모델은 최대 8[m] 이내에서는 자유 공간 경로 손실로 표현하고, 8[m] 이상의 거리에서는 복잡한 환경으로 구성된 선행 모델로 조합하였다.

$$PL(d) = \begin{cases} 40.2 + 20 \log_{10}(d) & 0.5 [m] < d \leq 8 [m] \\ 58.5 + 33 \log_{10}(d/8) & d > 8 [m] \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $PL(d)$ 는 거리  $d$ 에 따른 경로 손실을 나타낸다.

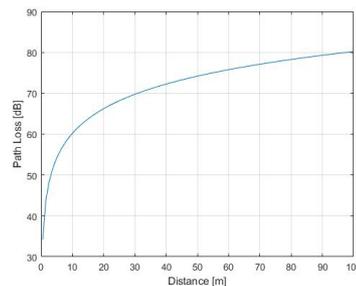


그림 3. 경로 손실 모델  
Fig. 3. Path loss model.

BLE 시스템의 공존 성능을 분석하기 위한 동일채널간섭 모델에서 BLE 시스템 수신기에서의 신호 전력 및 간섭 전력은 송신기에서의 신호 전력, 간섭 전력, 무선 통신 시스템의 통신 거리에 따른 식 (1)의 경로 손실을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} P_{S,dB}^R &= P_{S,dB}^T - PL(D) \\ P_{I,dB}^R &= P_{I,dB}^T - PL(d) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $P_{S,dB}^R, P_{S,dB}^T$  는 BLE 시스템의 수신 신호 전력과 송신 신호 전력을 의미하며  $P_{I,dB}^R, P_{I,dB}^T$  는 간섭원으로 작용하는 IEEE 802.15.4 시스템의 수신 신호 전력과 송신 신호 전력을 의미한다. 수신기 필터이후의 간섭 전력은 간섭신호의 대역폭 수신기 필터의 대역폭에 따라 영향을 받게 되며 식 (2)를 이용하여 BLE 시스템 수신기에서의 신호 전력 대 간섭 전력비는 다음과 같다.

$$\gamma_{SIR} = 10^{(P_{S,dB}^R - P_{I,dB}^R)/10} \quad (3)$$

### 3-2 BLE 시스템 성능 분석

GFSK(Gaussian Frequency Shift Keying)는 FSK(Frequency Shift Keying) 방식에서 신호를 전송하기 위해 주파수를 변환할 때 임펄스 응답이 가우시안 함수인 가우시안 필터(Gaussian Filter)를 사용하여 데이터를 전송한다. 디지털 신호 0과 1에 가우시안 필터를 사용하면 FSK 주파수가 급격하게 변하면서 발생하는 다른 주파수 영역으로의 간섭을 감소시킬 수 있으며 최소의 그룹 지연이 발생할 수 있는 장점을 가진다.

BLE 시스템은 대역폭  $BW_S = 1[MHz]$ , 비트 전송률  $R_b = 1[Mbps]$ ,  $BT = 0.5$ , 변조 지수  $h = 0.5$ 인 GFSK 변조를 사용한다. 상대적으로 낮은 성능을 보이는 비동기 복조는 복조기의 하드웨어 아키텍처를 단순화하기 위해 선호되며 이러한 유형의 비동기 복조의 경우 BLE 시스템의 오율은 다음과 같다.

$$P_{ber1} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma_{SIR}}{2}\right) \quad (4)$$

식(4)는 변조 지수  $h = 0.5$ 인 직교 변조 방식을 가정하는 경우 BLE 시스템의 오율에 대한 하한식을 나타내고 있다. 일반적인 블루투스 시스템에서는 변조 지수  $h$ 가 0.5보다 작은 [0.28~0.35] 범위의 값을 사용하며 이러한 비 직교 변조 방식에서 블루투스 시스템의 오율은 다음과 같다.

$$P_{ber2} = Q_1(a,b) - 0.5 \exp(-0.5(a^2 + b^2)) I_0(ab) \quad (5)$$

여기서  $Q_1(a,b)$ 는 Marcum Q-함수를 나타내며 다음과 같이

정의된다.

$$Q_1(a,b) = \exp(-0.5(a^2 + b^2)) \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{b}\right)^n I_n(ab) \quad (6)$$

여기서  $I_n(x)$ 는  $n$ 차 수정 베셀 함수이며  $a$ 와  $b$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{0.5\gamma_{SIR} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\sin 2\pi h}{2\pi h}\right)^2}\right)} \\ b &= \sqrt{0.5\gamma_{SIR} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\sin 2\pi h}{2\pi h}\right)^2}\right)} \end{aligned} \quad (7)$$

블루투스 시스템에서 기본 속도로 데이터를 전송하는 경우 변조 지수  $h$ 가 [0.28~0.35] 범위에서 오류 확률  $P_{ber2}$ 을 계산하면 된다. 또한, 신호 패킷과 간섭 패킷이 완전한 충돌이 발생하는 최악의 시나리오에서는 BLE 시스템의 오율은 BLE 패킷에서 전송되는 각 비트에 대해 동일하다고 가정할 수 있다. 따라서 신호의 패킷 길이가  $L_s$ 로 구성된 BLE 시스템의 패킷 오율은 다음과 같다.

$$P_{per} = 1 - (1 - P_{ber})^{L_s} \quad (9)$$

여기서  $P_{ber}$ 는 직교 및 비 직교 변조 방식에서 블루투스 시스템의 비트 오율이다.

동일채널간섭의 영향을 감소시키기 위하여 최소거리  $d_{min} = n - k + 1$ 를 가지는  $RS(n,k)$  부호를 적용하면  $t_{ec} = (n - k)/2$ 개의 에러를 정정할 수 있다. 따라서 동일채널 간섭 환경에서  $RS(n,k)$  부호화를 거친 BLE 시스템의 오율은 다음과 같다.

$$P_{RS} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=t_{ec}+1}^n \binom{n}{i} P_{ber}^i (1 - P_{ber})^{n-i} \quad (10)$$

여기서  $\binom{n}{i} = \frac{n!}{(n-i)!i!}$ 이다.

### IV. 성능 분석

본 논문에서는 동일채널간섭 환경에서 BLE 시스템의 성능을 분석하기 위하여 간섭원으로 IEEE 802.15.4 시스템을 대상으로 선정하고 BLE 시스템의 성능을 분석하였다. 먼저 시스템에 영향을 주는 동일채널간섭을 모델링하고 신호 및 간섭의 전력과 채널의 경로 손실 모델을 사용하여 BLE 시스템에서 신호 전력 대 간섭 전력 비를 분석하였고 최종적으로 BLE 시스템에서 신호 전력 대 간섭 전력 비의 함수로 BLE 시스템의 성능을 비교 분석한다. 그림 4~그림 8은 잡음 및 동일채널간섭 환경에서 블루투스 시스템과 BLE 시스템의 오율 성능을 분석한 결과이다.

그림 4는 잡음 환경에서 변조 지수에 따른 블루투스 시스템의 BER(Bit Error Rate) 성능을 나타낸다. 변조 지수가 증가함에 따라서 블루투스 시스템의 오류 성능은 개선됨을 알 수 있었다. 그림 5는 잡음 환경에서 신호의 패킷 길이  $L_S = 240$ 인 경우 블루투스 시스템의 PER(Packet Error Rate) 성능을 나타낸다. 그리고 그림 6은 그림 5와 동일한 환경에서 신호의 패킷 길이  $L_S = 1496$ 인 경우이다. 블루투스 시스템에서  $L_S = 240$ 인 경우는 DH1 ACL(Data High 1 Asynchronous Connection Less) 패킷 길이며  $L_S = 1496$ 인 경우는 DH3 ACL 패킷 길이에 해당한다. 블루투스 시스템에서 신호의 패킷 길이가 증가함에 따라서 PER 성능은 열화됨을 알 수 있었다. 그림 7은 신호원 전력과 간섭원 전력이  $P_S^T = 5[dBm]$ ,  $P_I^T = 0[dBm]$ 인 동일채널간섭 환경에서 블루투스 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 동일채널 간섭원으로 선정된 IEEE 802.15.4 시스템과 블루투스 시스템 사이의 거리  $d$ 가 증가함에 따라서 간섭의 양이 감소하여 BLE 시스템의 BER 성능은 개선됨을 알 수 있었다. 그림 8은 신호원 전력이  $P_S^T = 5[dBm]$ 이고 간섭원 전력이  $P_I^T = 0[dBm]$ 인 동일채널간섭 환경에서 BLE 시스템과 IEEE 802.15.4 시스템 사이의 거리에 따른 BLE 시스템의 PER 성능을 나타낸다. 신호원과 간섭원 시스템 사이의 거리가 증가함에 따라서 BLE 시스템의 PER 성능은 우수해짐을 알 수 있었다. 또한 RS(31,27) 부호화를 적용함으로써 BLE 시스템의 오류 성능은 개선됨을 알 수 있었다.

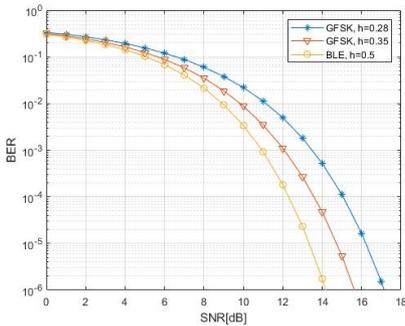


그림 4. 잡음 환경에서 블루투스 시스템의 BER 성능  
 Fig. 4. BER performance of Bluetooth system under AWGN environment.

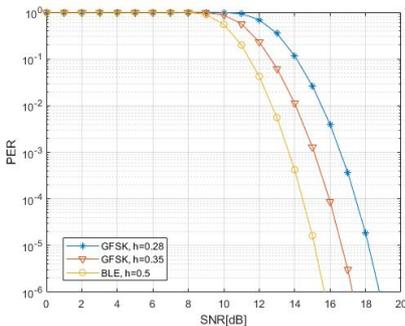


그림 5. 잡음 환경에서 블루투스 시스템의 PER 성능( $L_S = 240$ )  
 Fig. 5. PER performance of Bluetooth system under AWGN environment ( $L_S = 240$ ).

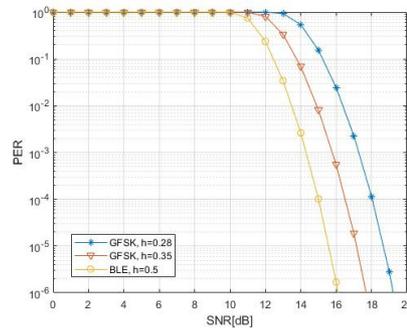


그림 6. 잡음 환경에서 블루투스 시스템의 PER 성능( $L_S = 1496$ )  
 Fig. 6. PER performance of Bluetooth system under AWGN environment ( $L_S = 1496$ ).

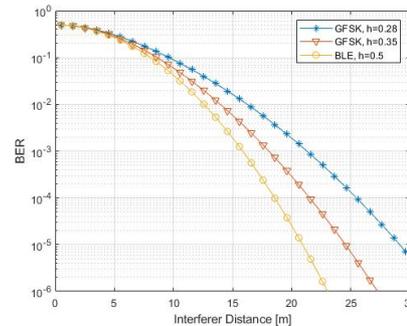


그림 7. 동일채널간섭 환경에서 블루투스 시스템의 BER 성능 ( $P_S^T = 5[dBm]$ ,  $P_I^T = 0[dBm]$ )  
 Fig. 7. BER performance of Bluetooth system under co-channel interference environment ( $P_S^T = 5[dBm]$ ,  $P_I^T = 0[dBm]$ ).

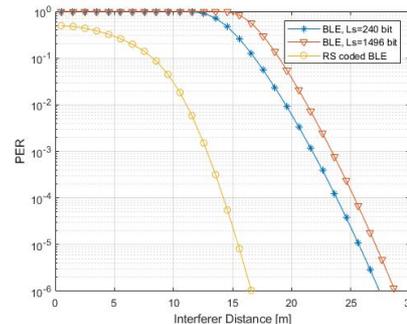


그림 8. 동일채널간섭 환경에서 RS 부호화된 BLE 시스템의 PER 성능 ( $P_S^T = 5[dBm]$ ,  $P_I^T = 0[dBm]$ )  
 Fig. 8. PER performance of RS coded BLE system under co-channel interference environment ( $P_S^T = 5[dBm]$ ,  $P_I^T = 0[dBm]$ ).

## V. 결 론

BLE 통신 시스템은 낮은 에너지 소비로 우수한 성능을 보이고 있으며 산업, 과학, 의료분야의 2.4 [GHz] 주파수 대역에서 전 세계적으로 사용이 가능하기 때문에 다양한 상호 운용이 가능해야 한다. 하지만 여러 종류의 무선 통신 시스템이 2.4 [GHz] ISM 주파수 대역에서 집중적으로 사용됨으로써 동일채널간섭이 증가하고 있는 상태이다. 논문에서는 동일채널간섭 환경에서 BLE 통신 시스템의 성능을 분석하기 위하여 간섭원으로 IEEE 802.15.4 시스템을 대상으로 선정하고 BLE 통신 시스템의 성능을 분석하였다. 잡음과 동일채널간섭이 존재하는 환경에서 신호의 변조 지수가 증가함에 따라서 블루투스 시스템의 오율 성능은 개선됨을 알 수 있었다. 그리고 블루투스 시스템에서 신호의 패킷 길이가 증가함에 따라서 오율 성능은 열화되었고 간섭원으로 선정한 IEEE 802.15.4 시스템과 블루투스 시스템 사이의 거리가 증가함에 따라서 동일채널간섭의 양이 감소하여 BLE 시스템의 오율 성능은 개선됨을 알 수 있었다.

## Acknowledgments

본 논문은 2022년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

## References

[1] B. Sklar, *Digital Communications*, 2nd ed. New York, NY:

Pearson, 2001.

[2] B.K.Tripathy and J.Anuradha, *INTERNET OF THINGS (IoT) Technologies, Applications, Challenges, and Solutions*, CRC Press, 2018.

[3] N. Gupta, *Inside Bluetooth Low Energy*, 2nd ed. New York, Artech House, 2016.

[4] M. Shimizu, N. Aoki, K. Shirakawa, Y. Tozawa, N. Okubo, and Y. Daido, "New method of analyzing BER performance of GFSK with postdetection filtering," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 45, No. 4, pp. 429-436, April, 1997.

[5] I. Howitt, "Bluetooth performance in the presence of 802.11b WLAN," *IEEE Transactions on Veh. Technol.* Vol. 51, No. 6, pp.1640-1651, 2002.

[6] J. Liu, C. Chen, and Y. Ma, "Modeling Neighbor Discovery in Bluetooth Low Energy Networks," *IEEE Communications Letters*, Vol. 16, No. 9, pp. 1439-1441, Sep. 2012.

[7] C. Gomez, I. Demirkol, and J. Paradells, "Modeling the Maximum Throughput of Bluetooth Low Energy in an Error-Prone Link," *IEEE Communications Letters*, Vol. 15, No. 11, pp.1187-1189, Nov. 2011.

[8] R. G. Garroppo, L. Gazzarrini, S. Giordano, and L. Tavanti, "Experimental assessment of the coexistence of WiFi, ZigBee, and Bluetooth devices," *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, pp. 1-9, 2011.

[9] S. Silva, T. Fernandes, A. Valente, and A. Moreira, "Coexistence and Interference Tests on a Bluetooth Low Energy Front-End," *IEEE Science and Information Conference*, pp. 1014-1018, 2014.



노재성 (Jae-Sung Roh)

2000년 8월 : 한국항공대학교 정보통신공학과 (공학박사)

2000년 9월 ~ 현재 : 서일대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심분야 : 무선 임베디드 통신 시스템, IoT S/W