

논문 2012-50-6-3

# 다양한 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 성능 분석

( Performance Analysis of IEEE 802.15.4/ZigBee System in  
Various Channel Environments )

문 상 미\*, 김 보 라\*, 사란쉬 말리크\*, 김 영 일\*\*, 여 건 민\*\*, 김 대 진\*\*\*, 황 인 태\*\*\*

( Sangmi Moon, Bora Kim, Saransh Malik, Youngil Kim, Kunmin Yeo,  
Daejin Kim, and Intae Hwang<sup>©</sup> )

## 요 약

최근 무선 센서 네트워크(WSN: Wireless Sensor Network)가 큰 관심을 받고 있으며, IEEE 802.15.4 표준 규격을 기반으로 상위 계층 규격을 표준화하여 산업 분야에 적용하기 위한 ZigBee의 필요성이 대두되고 있다. 현재 IEEE 802.15.4/ZigBee 통신 채널에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 다양한 채널 환경에 대한 성능 분석 또한 관심의 대상이다. 본 논문에서는 다양한 채널 환경에서의 IEEE 802.15.4 전파전파 특성분석을 통한 채널 모델을 제안한다. 또한 IEEE 802.15.4/ZigBee 표준의 2.4GHz 대역 물리계층에서 각 채널 환경에 대한 성능을 비교 분석한다.

## Abstract

Wireless Sensor Network(WSN) has attracted great interest recently and the necessity of ZigBee has appeared to standardize and apply the upper layer specification based on the IEEE 802.15.4 standard specification in industrial field. Currently, there are many studies about the IEEE 802.15.4/ZigBee communication channel. And it is subject of interest to analyze the performance in various channel environments. In this paper, we propose channel models through the analysis of the IEEE 802.15.4 radio wave propagation characteristics in various channel environments. Also, we have analyzed the performance of the IEEE 802.15.4/ZigBee for the standard of physical layer of 2.4GHz band in each channel environments.

**Keywords :** IEEE 802.15.4, ZigBee, Channel environment, Radio wave propagation

---

\* 학생회원, \*\*\* 평생회원, 전남대학교 전자컴퓨터공학과

(School of Electronics & Computer Engineering, Chonnam National University)

\*\* 정회원, 한국전자통신연구원 모바일미디어응용기술연구소실

(Mobile Media Application Technology Research Lab, Electronics and Telecommunications Research Institute)

※ 본고는 산업기술연구회 융합연구사업 일환으로 수행한 연구로부터 도출되었음[과제번호: B551179-12-07-00]

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-H0301-13-3005)

※ 이 논문은 2012년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

© Corresponding Author(E-mail: [hit@chonnam.ac.kr](mailto:hit@chonnam.ac.kr))

접수일자 2013년2월8일, 수정완료일 2013년5월21일

## I. 서 론

센서 장치들을 무선으로 연결하여 네트워크를 형성하는 무선 센서 네트워크(WSN: Wireless Sensor Network) 기술은 사람 중심의 정보 운용 형태를 확장하여 언제 어디서든 사람과 사물뿐만 아니라 사물 간의 정보 공유를 가능하게 하며, 유비쿼터스 환경으로 진화하고 있다. 유비쿼터스 센서 네트워크에서 사용되는 센서와 이를 구동시키는 센서 노드는 사람이 직접 소지하여 이를 제어할 수도 있으나, 사람의 제어가 되기 전에 주변의 환경에 맞게 최적의 서비스가 제공되어야 한다. 또한 철도분야에서도 효율적인 관리와 유지보수라는 측면에서 적용되어 사람이 접근하기 힘든 환경에 제공이 될 수 있다<sup>[1]</sup>.

무선 센서 네트워크 관련 표준기술 중 하나인 무선 근거리 개인 통신망(WPAN: Wireless Personal Area Network)의 개념을 도입한 Bluetooth는 표준화가 완료되었다. WPAN은 개인 주변의 영역을 주 동작범위로 하여, 저가격, 저전력, 근거리, 소형화를 추구하는 네트워크 개념이다. 그러나 무선랜과 Bluetooth를 적용하기에 적합하지 않은 많은 응용 사례가 있음에 따라, 전송 규격을 위한 IEEE 802.15.4 표준 규격과 이를 기반으로 상위 계층 규격을 정하여 관련 산업에 적용하려는 ZigBee의 필요성이 대두되었다<sup>[2]</sup>.

IEEE 802.15.4는 작은 패킷 사이즈를 갖는 온/습도, 미터링 데이터를 수집하기 위한 저전력의 단순 모니터링 서비스를 염두해 두어 표준화가 진행되었으며, ZigBee에서는 이러한 용도의 응용에 부합하는 네트워크 계층 규격과 여러 애플리케이션 프로파일을 정의하여 시장에 관련 제품 등을 선보이기도 했다.

본 논문에서는 다양한 채널 환경에서의 IEEE 802.15.4/ZigBee 전파전파 특성분석을 통해 각 채널 모델에 적합한 PDP(Power Delay Profile) 및 최대 도플러 주파수를 적용함으로써 채널 모델링이 이루어진다. 또한 각 채널환경에 대하여 성능 분석은 IEEE 802.15.4/ZigBee 표준의 2.4GHz 대역의 물리계층을 기반을 두고 있다. 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 특징, 요구사항 및 구조에 대해 기술하고 제 III장에서는 IEEE 802.15.4 전파전파 특성분석 및 채널 모델링에 대하여 기술하였으며 제 IV장에서는 모의실험을 통해 제안한 채널 모델에

대한 에러율과 RSSI(Received Signal Strength Indicator)에 대하여 성능을 분석한다. 마지막으로 제 V장에서 결론을 맺는다.

## II. IEEE802.15.4/ZigBee 시스템의 개요

1. IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 특징 및 요구사항  
IEEE802.15.4/ZigBee PHY는 기존의 무선 통신 시스템의 PHY에 비해 낮은 data rate를 사용하므로 간단한 구조로 이루어져 있다.

표 1은 IEEE 802.15.4/ZigBee PHY 계층의 특징을 나타낸다.

두 물리계층 사이의 근본적인 차이는 주파수 대역으로 일반적으로 널리 활용되는 ISM 대역인 2.4GHz와 유럽과 미국의 868/915MHz 대역으로 유럽에서는 868MHz 대역을, 미국에서는 915MHz 대역을 사용한다. 그리고 물리계층의 사용대역에 따라 전송속도가 다르며 2.4GHz 대역에서는 O-QPSK 변조방식에 의해 250kbps의 전송속도를 제공하고, 868/915MHz 대역은 BPSK 변조방식에 의해 각각 20kbps와 40kbps 전송속도를 제공한다<sup>[3]</sup>. 본 논문에서는 2.4GHz를 기준으로 연구하였고 2.4GHz에 대한 자세한 내용은 2.2절에서 다루도록 한다.

PHY 계층에서 생성된 패킷인 PPDU(PHY Protocol Data Unit) format은 그림 1과 같다. PPDU는 동기를 위한 Preamble과 SoP(Start of Packet) Delimiter, 물리 계층 헤더 및 PSDU(PHY Service Data Unit)로 구성되어 있다.

모니터링, 보안관리, 등화, 온도 제어기와 같은 간단한 실내 가전을 위한 응용에서의 패킷 데이터 길이는 30~60 Byte 정도가 되며, 대화 형 게임, 컴퓨터 주변장치 등과 같은 경우는 좀 더 긴 패킷 데이터 길이를 갖

표 1. IEEE 802.15.4/ZigBee PHY 계층의 특징  
Table 1. Characteristic of IEEE 802.15.4/ZigBee PHY layer.

Frequency band		868/915 MHz	2.4 GHz
Spreading Parameter	Chip Rate (kcps)	300 @ 868 MHz 600 @ 915 MHz	2000
	Modulation	BPSK	O-QPSK
Data Parameter	Bit Rate (kbps)	20 @ 868 MHz 40 @ 915 MHz	250
	Symbol Rate (ksps)	20 @ 868 MHz 40 @ 915 MHz	62.5
	Symbol	Binary	16-ary Orthogonal

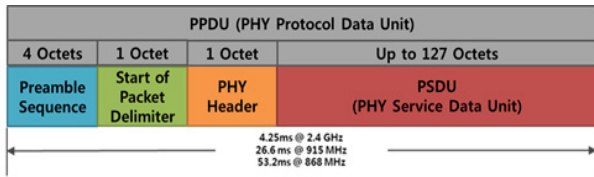


그림 1. IEEE 802.15.4 PHY 계층의 패킷 구조  
 Fig. 1. Packet structure of IEEE 802.15.4 PHY layer.

표 2. IEEE 802.15.4/ZigBee RF 요구사항  
 Table 2. Requirement of IEEE 802.15.4.ZigBee RF.

Transmit Power	0dBm
Transmit center frequency tolerance	±40 ppm
Receiver sensitivity (PSDU length = 20 octets, PER <1%)	-85dBm @ 2.4 GHz band -92dBm @ 868/915 MHz band
Receiver Selectivity	2.4 GHz: 5 MHz channel spacing, 0 dB adjacent channel requirement
Channel Selectivity and Blocking	915 MHz and 2.4 GHz band : 0dB rejection of interference from adjacent channel : 30dB rejection of interference from alternate channel
Rx Signal Strength Indication Measurements	Packet strength indication, Clear channel assessment, Dynamic channel selection

게 될 것이다. 각 대역에서 전송률을 조정하여 최대의 패킷 주기는 2.4GHz에서 4.25ms, 915MHz에서 26.6ms, 868MHz에서 53.2ms가 될 것이다.

표 2는 IEEE 802.15.4/ZigBee RF 요구사항을 나타낸다. 일반적으로 ZigBee system이 10m의 근거리에서 동작할 것으로 예측되기 때문에 10m 거리에서의 감쇄가 약 70~80dB 사이에서 일어나게 된다. 따라서 margin을 감안한 Transmit Power를 0dBm으로 정할 수 있다<sup>[4]</sup>. Sensitivity는 방해파가 없는 상태에서 20 octets의 PSDU에 대해 1%의 패킷 에러율을 만족하는 경우를 기준으로 산정한다.

2. IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 구조

2.4GHz 물리 계층의 데이터 속도는 250kbps이고 16-ary orthogonal modulation을 사용하여 데이터를 전송한다. 그리고 각 심볼 구간 동안 4개의 정보 bit을 하나의 심볼로 mapping하고 각 심볼에 따라 16개의 PN 시퀀스 중 하나를 선택하여 확산시키고 각 chip 시퀀스를 O-QPSK(Offset Quadrature Phase Shift Keying) 방식으로 변조시켜 펄스 성형 후 전송한다<sup>[3]</sup>. 이후의 과

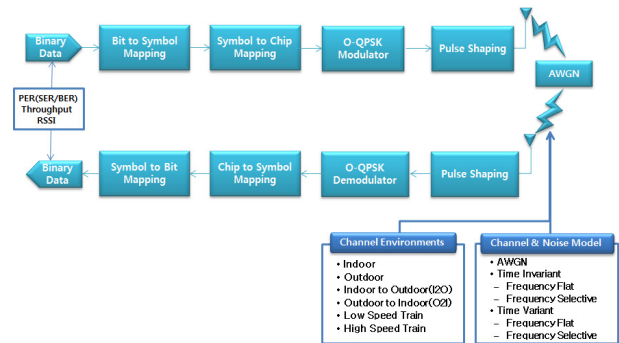


그림 2. IEEE802.15.4/ZigBee PHY 통신 시스템의 구조  
 Fig. 2. Structure of IEEE 802.15.4/ZigBee PHY communication system.

정은 송신단의 역과정이며, 이를 통해 원래 신호로 복원된다.

그림 2는 PPDU로부터 입력 받은 Binary data 신호에 대한 주파수 대역이 2.4GHz인 IEEE802.15.4/ZigBee PHY 통신 시스템의 송·수신단과 구조이다.

III. IEEE 802.15.4 전파전파 특성 분석 및 채널 모델링

본 논문에서는 다양한 채널 환경에서의 IEEE 802.15.4 특성 분석을 하고 ITU Standard Multipath Channel Model을 기반으로 각 채널 모델에 적합한 PDP 및 도플러 주파수를 적용함으로써 채널 모델링을 제안한다.

1. 일반 채널 환경

가. 옥내 채널 환경

옥내 채널 환경은 자유공간과는 달리 전파를 그림 3과 같이 가구, 내부 벽, 가전제품 등 여러 가지 장애물

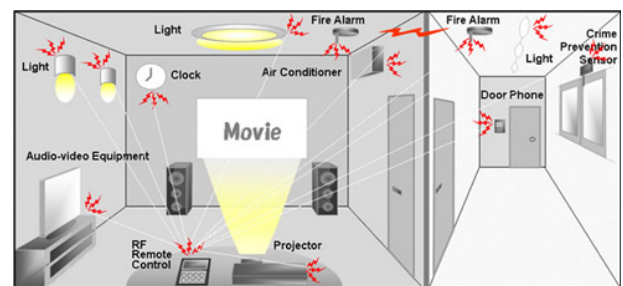


그림 3. 옥내 채널 환경의 예  
 Fig. 3. Example of indoor channel environment.

표 3. 옥내 채널 모델의 Power Delay Profile  
Table 3. Power Delay Profile of indoor channel model.

Channel	Excess tap delay [ns]	Relative Power [dB]
Indoor	[0 50 110 170 290 310]	[0 -3 -10 -18 -26 -32]

표 4. 옥내 채널 모델의 최대 도플러 주파수  
Table 4. Maximum Doppler Frequency of indoor channel model.

Object maximum speed *carrier freq. 2.4 GHz	Maximum Doppler frequency
2 km/h	5 Hz
5 km/h	11 Hz

들로 이루어져 있다<sup>[5]</sup>. 따라서 직접파(LOS: Line of Sight) 뿐만 아니라 장애물과 충돌하여 산란된 신호들과 같은 반사파가 발생한다.

옥내 채널 환경에서의 PDP는 ITU Standard Multipath Channel Model의 Indoor office를 사용하였다. 옥내 채널 환경에서의 PDP를 정리하면 표 3과 같다<sup>[6]</sup>.

ZigBee 모듈을 가지고 있는 사람의 이동이나 ZigBee 모듈이 장착된 제품이 이동할 때 도플러 확산이 일어날 수 있다. 옥내 채널 환경의 경우 옥외 채널 환경보다 범위가 좁은 환경이므로 비교적 낮은 속도로 이동한다고 할 수 있다. 옥내 채널 환경에서의 최대 도플러 주파수( $f_d$ )는 표 4와 같다.

표 3과 표 4에 대하여 각각 채널 주파수 응답(CFR: Channel Frequency Response)과 채널 임펄스 응답(CIR: Channel Impulse Response)을 3차원 그래프로 통해 살펴보면 그림 4와 같다.

최대 도플러 주파수가 다른 환경에 비해 상대적으로

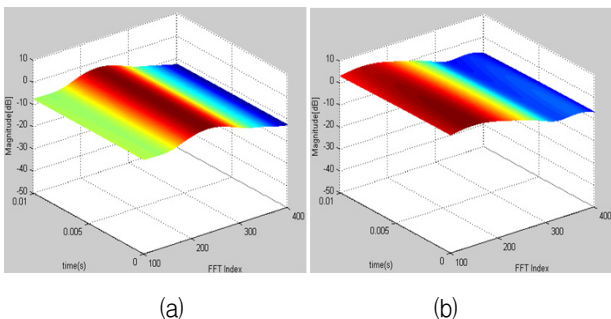


그림 4. 옥내 환경에서 시변 주파수 선택적 채널의 응답: (a)  $f_d = 5\text{Hz}$ , (b)  $f_d = 11\text{Hz}$

Fig. 4. Response of time variant frequency selective channel in indoor environments: (a)  $f_d = 5\text{Hz}$ , (b)  $f_d = 11\text{Hz}$ .

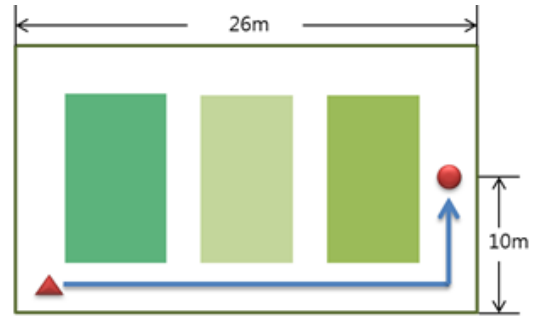


그림 5. 옥내 경로 손실 환경  
Fig. 5. Indoor path loss environment.

작아 10ms 동안 시간 도메인에서 변화가 채널 거의 없고 또한 최대 tap delay가 310ns이기 때문에 주파수 도메인에서 채널 변화가 거의 없다.

옥내 채널 환경에서의 경로 손실은 그림 5와 같은 일반적인 건물 내부의 구조에서 실험이 이루어졌다<sup>[7]</sup>.

그 결과 경로 손실 수식은 식 1과 식 2와 같다.

$$PL[dB] = 47.7 + 10.7 \times \log d(d[m] \leq R_1) \quad (1)$$

$$PL[dB] = 160.2 + 166.1 \times \log d(d[m] > R_1) \quad (2)$$

여기서  $d$ 는 송신단과 수신단 사이의 거리,  $R_1$ 은 corner point를 나타낸다.

#### 나. 옥외 채널 환경

무선 통신은 그림 6과 같은 옥외 여러 환경에서 이루어 질 수 있다<sup>[8-9]</sup>.

옥외 채널 환경에서의 PDP는 ITU Standard Multipath Channel Model의 3GPP LTE Channel Model 중 EPA(Extended Pedestrian A)를 사용하였다.

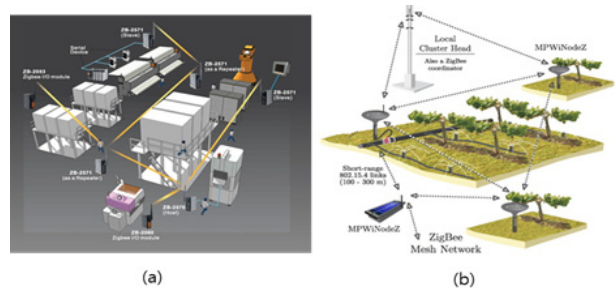


그림 6. 옥외 채널 환경의 예:  
(a) 공장 환경, (b) 재배 환경

Fig. 6. Example of outdoor channel environment:  
(a) Factory environment  
(b) Cultivation environment.

표 5. 옥외 채널 모델의 Power Delay Profile  
Table 5. Power Delay Profile of outdoor channel model.

Channel	Excess tap delay [ns]	Relative Power [dB]
Outdoor	[0 30 70 90 110 190 410]	[0.0 -1.0 -2.0 -3.0 -8.0 -17.2 -20.8]

표 6. 옥외 채널 모델의 최대 도플러 주파수  
Table 6. Maximum doppler frequency of outdoor channel model.

Object maximum speed *carrier freq. 2.4 GHz	Maximum Doppler frequency
30 km/h	70 Hz
70 km/h	155 Hz

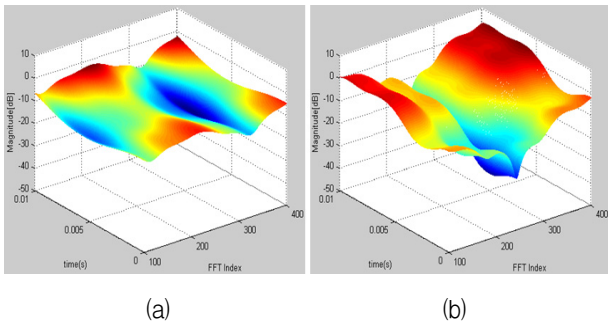


그림 7. 옥외 환경에서 시변 주파수 선택적 채널의 응답: (a)  $f_d = 70\text{Hz}$ , (b)  $f_d = 155\text{Hz}$   
Fig. 7. Response of time variant frequency selective channel in outdoor environments: (a)  $f_d = 70\text{Hz}$ , (b)  $f_d = 155\text{Hz}$ .



그림 8. 옥외 경로 손실 환경  
Fig. 8. Outdoor path loss environment.

옥외 채널 환경에서 PDP를 정리하면 표 5와 같다<sup>[10]</sup>. 이동하는 차량과 같은 곳에 ZigBee 모듈이 장착되었을 때 통신을 하게 되면 낮은 최대 도플러 주파수부터 비교적 높은 최대 도플러 주파수까지 다양한 범위의 도플러 확산이 발생한다. 옥외 채널 환경에서의 최대 도플러 주파수는 표 6과 같다.

표 5와 표 6에 대하여 각각 CFR과 CIR을 3차원 그래프로 통해 살펴보면 그림 7과 같다.

최대 도플러 주파수와 최대 tap delay가 옥내 채널

환경에 비해 상대적으로 크기 때문에 10ms 동안 시간 도메인에서 채널 변화와 주파수 도메인에서 채널 변화가 약하게 발생한다.

옥외 채널 환경에서의 경로 손실은 그림 8과 같은 도로와 건물 사이의 공원에서 실험이 이루어졌다<sup>[7]</sup>.

그 결과 경로 손실 수식은 식 3과 같다.

$$PL[dB] = 39.1 + 19.7 \times \log d[m] \quad (2)$$

여기서 d는 송신단과 수신단 사이의 거리를 나타낸다.

## 2. 철도 채널 환경

철도 채널 환경에서는 그림 9와 같이, ZigBee Slave가 열차 휠의 중심에 설치되고 ZigBee Master는 열차 프레임 중심에 설치되어 ZigBee 통신이 이루어진다.

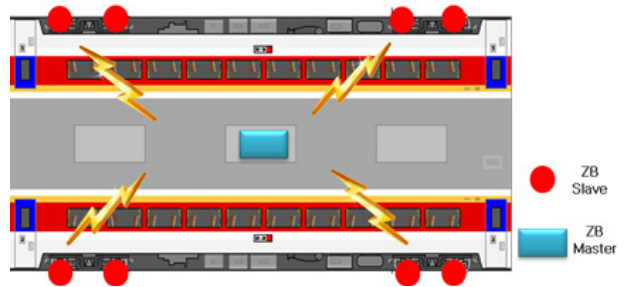


그림 9. 철도 채널 환경의 예  
Fig. 9. Example of train channel environment.

### 가. 저속 철도 채널 환경

ZigBee 통신 과정에서 지면 반사에 의한 다중경로(Multipath)가 생겨난다. 따라서, 저속 철도 채널 환경에서의 PDP는 ITU Standard Multipath Channel Model의 3GPP LTE Channel Model 중 EVA (Extended Vehicular A)를 사용하였다. 저속 철도 채널 환경에서의 PDP를 정리하면 표 7과 같다<sup>[10]</sup>.

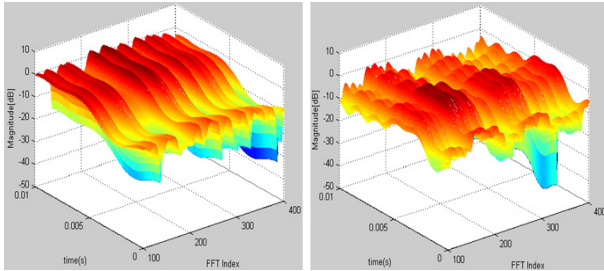
표 8은 철도 채널 모델 중 저속 철도 채널 환경에서의 최대 도플러 주파수이다. 70km/h와 135km/h를 고려하였으며, 이는 현재 우리나라에서 저속으로 운행되고

표 7. 저속 철도 채널 모델의 Power Delay Profile  
Table 7. Power Delay Profile of low speed train channel model.

Channel	Excess tap delay [ns]	Relative Power [dB]
Low Speed Train	[0 30 150 310 370 710 1090 1730 2510]	[0.0 -1.5 -1.4 -3.6 -0.6 -9.1 -7.0 -12.0 -16.9]

표 8. 저속 철도 채널 모델의 최대 도플러 주파수  
Table 8. Maximum doppler frequency of low speed train channel model.

Object maximum speed *carrier freq. 2.4 GHz				Maximum Doppler frequency
70 km/h	19.44 m/s	1944 cm/s	1.94 cm/ms	155 Hz
135 km/h	37.50 m/s	3750 cm/s	3.75 cm/ms	300 Hz



(a) (b)

그림 10. 저속 철도 환경에서 시변 주파수 선택적 채널의 응답: (a)  $f_d = 155\text{Hz}$ , (b)  $f_d = 300\text{Hz}$   
Fig. 10. Response of time variant frequency selective channel in low speed train environments: (a)  $f_d = 155\text{Hz}$ , (b)  $f_d = 300\text{Hz}$ .

있는 무궁화호와 새마을호의 평균 시속과 최고 시속이다. 철도 채널의 경우 열차의 진동으로 인한 안테나 수신 주파수 변동이 발생하며, 열차 속도에 따른 최대 도플러 주파수에 이를 반영하였다.

표 7과 표 8에 대하여 각각 CFR과 CIR을 3차원 그래프로 통해 살펴보면 그림 10과 같다.

최대 도플러 주파수와 최대 tap delay가 일반 채널 환경에 비해 상대적으로 크기 때문에 10ms 동안 시간 도메인에서 채널 변화율과 주파수 도메인 채널 변화율이 빠르다.

저속 철도 환경에서의 경로 손실은 log-normal shadowing 모델을 사용하였으며, 다음과 같이 주어진다<sup>[11]</sup>.

$$PL[dB] = \overline{PL}_F(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3)$$

여기서  $\overline{PL}_F$ 는 자유 경로 손실,  $d_0$ 는 기준 거리,  $n$ 은 경로 손실 지수,  $X_\sigma$ 는  $\sigma$ 의 표준 편차를 가지고 있는 평균이 0인 Gaussian 랜덤 변수이다.

저속 철도 환경에서는 ZigBee Master의 위치에 따라 다른 경로 손실이 발생한다. 시나리오 1(S1)은 ZigBee Master가 외부에 설치된다고 가정한다. 시나리오 2(S2)와 시나리오 3(S3)은 ZigBee Master가 열차 프레임 내

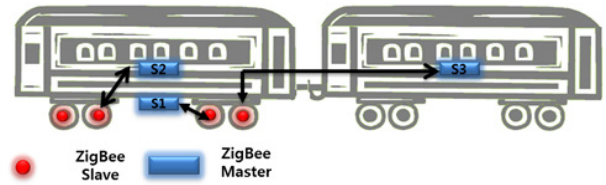


그림 11. 철도 채널 환경에서 ZigBee Master의 위치에 따른 경로 손실 시나리오  
Fig. 11. Path loss scenarios according to the location of the Zigbee Master in train channel environment.

표 9. 철도 채널 시나리오에 따른 경로 손실 및 투과 손실  
Table 9. Path loss and Penetration loss according to train channel scenario.

Scenario	Path Loss Exponent (n)	Standard Deviations $X_\sigma$ (dB)	Penetration Loss (dB)
Scenario 1	2.76	12.9	0
Scenario 2	4.19	5.1	20
Scenario 3	5.04	6.5	32

부에 설치되어 있다. 시나리오 2는 ZigBee Master와 ZigBee Slave가 같은 열차 프레임에 설치되어 있고 시나리오 3은 서로 다른 열차 프레임에 설치되었다고 가정한다. 그림 11은 위에서 설명한 시나리오에 대한 그림이다.

또한, 철도 채널 환경에서는 경로 손실뿐만 아니라 투과 손실이 발생한다. 이는 열차 프레임 내부에 있는 ZigBee Master와 열차 프레임 외부에 있는 ZigBee Slave 사이 통신이 이루어질 때 발생한다. 열차 프레임은 금속으로 이루어져 있기 때문에 투과 손실이 20dB에서 32dB까지 발생한다. 따라서 시나리오 1은 ZigBee Master와 ZigBee Slave가 모두 외부에 설치되어 있기 때문에 투과 손실이 발생하지 않는다. 하지만 시나리오 2는 ZigBee Master가 ZigBee Slave와 같은 열차 프레임의 내부에 설치되어 20dB 투과 손실이 발생한다고 가정하고 시나리오 3은 ZigBee Master가 ZigBee Slave와 다른 열차 프레임의 내부에 설치되어 있기 때문에 시나리오 2보다 더 큰 32dB 투과 손실이 발생한다고 가정한다.

이와 같이 각각의 시나리오 대해 적용되는 경로손실 지수  $n$ ,  $X_\sigma$  및 투과손실을 정리하면 표 9와 같다<sup>[12]</sup>.

### 나. 고속 철도 채널 환경

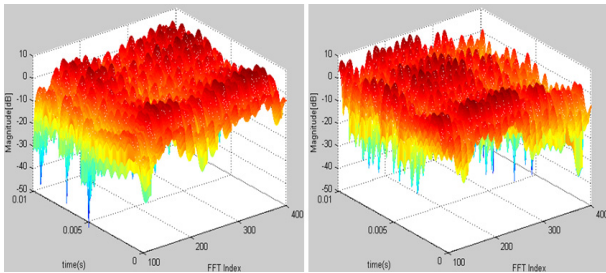
ZigBee 통신 과정에서 지면 반사에 의한 다중경로 (Multipath)가 생겨난다. 따라서, 고속 철도 채널 환경

표 10. 고속 철도 채널 모델의 Power Delay Profile  
Table 10. Power Delay Profile of high speed train channel model.

Channel	Excess tap delay [ns]	Relative Power [dB]
High Speed Train	[0 50 120 200 230 500 1600 2300 5000]	[-1.0 -1.0 -1.0 0.0 0.0 0.0 -3.0 -5.0 -7.0]

표 11. 고속 철도 채널 모델의 최대 도플러 주파수  
Table 11. Maximum doppler frequency of high speed train channel model.

Object maximum speed *carrier freq. 2.4 GHz				Maximum Doppler frequency
350 km/h	97.22 m/s	9722 cm/s	9.72 cm/ms	780 Hz
430 km/h	119.44 m/s	11944 cm/s	11.94 cm/ms	960 Hz



(a) (b)

그림 12. 고속 철도 환경에서 시변 주파수 선택적 채널의 응답: (a)  $f_d = 780\text{Hz}$ , (b)  $f_d = 960\text{Hz}$

Fig. 12. Response of time variant frequency selective channel in high speed train environments: (a)  $f_d = 780\text{Hz}$ , (b)  $f_d = 960\text{Hz}$ .

에서의 PDP는 ITU Standard Multipath Channel Model의 3GPP LTE Channel Model 중 ETU(Extended Typical Urban)에서 제안한 모델을 사용하였다. 고속 철도 채널 환경에서 PDP를 정리하면 표 10과 같다<sup>[10]</sup>.

표 11은 철도 채널 모델 중 고속 철도 채널 환경에서의 최대 도플러 주파수이다. 350km/h와 430km/h를 고려하였으며, 이는 각각 우리나라에서 운영되고 있는 KTX와 상용화될 예정인 HEMU-430X의 최고 시속이다.

표 10과 표 11에 대하여 각각 CFR과 CIR을 3차원 그래프로 통해 살펴보면 그림 12와 같다.

최대 도플러 주파수와 최대 tap delay가 일반 채널 환경 및 저속 채널 환경에 비해 상대적으로 매우 크기 때문에 10ms 동안 시간 도메인에서 채널 변화율과 주파수 도메인 채널 변화율이 매우 빠르다.

고속 철도 채널 환경에서는 저속 철도 채널 환경과

마찬가지로 같은 시나리오에서 경로 손실과 투과 손실이 적용된다.

#### IV. 모의실험 결과 분석

III장에서 제안된 다양한 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee의 성능을 분석하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험은 그림 2와 같이 IEEE 802.15.4/ZigBee 표준 2.4GHz 대역의 물리계층을 기반으로 이루어졌으며, PPDU로부터 입력 받은 Binary data의 길이는 PSDU의 최대 길이인 127 octets으로 133 octets(6 octets+ 127 octets)이다. 또한 ZigBee의 송신 전력은 IEEE802.15.4 기준의 0 dBm (1 mW)을 기준으로 PER(Packet Error Rate), SER(Symbol Error Rate) 및 BER(Bit Error Rate)에 대한 에러율을 성능과 RSSI에 대하여 성능 분석한다.

##### 1. 일반 채널 환경

##### 가. 옥내 채널 환경

그림 13과 그림 14는 각각 옥내 채널 환경에서 최대 도플러 주파수가 5Hz, 11Hz인 시변 주파수 선택적 채널의 에러율 성능을 나타낸다. PER이 1% 미만이 되기 위하여 SNR이 약 23.5dB 이상 요구된다.

그림 15는 옥내 채널 환경에서의 RSSI 성능을 나타낸다. 수신 전력이 -85dBm 이상일 때 수신된 신호를

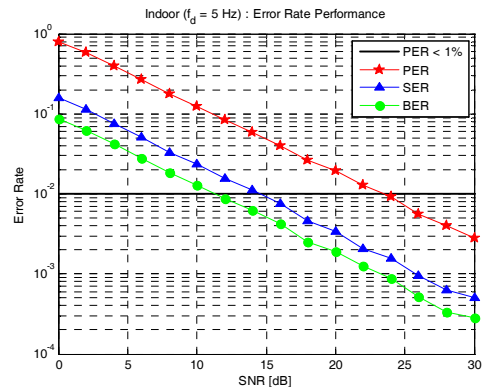


그림 13. 최대 도플러 주파수가 5Hz인 옥내 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 에러율

Fig. 13. Error rate of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the indoor channel environment with maximum doppler frequency of 5Hz.

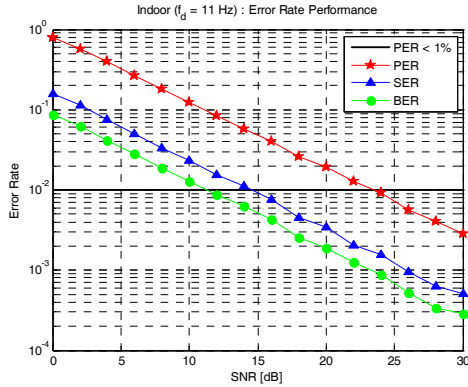


그림 14. 최대 도플러 주파수가 11Hz인 옥내 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 에러율  
Fig. 14. Error rate of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the indoor channel environment with maximum doppler frequency of 11Hz.

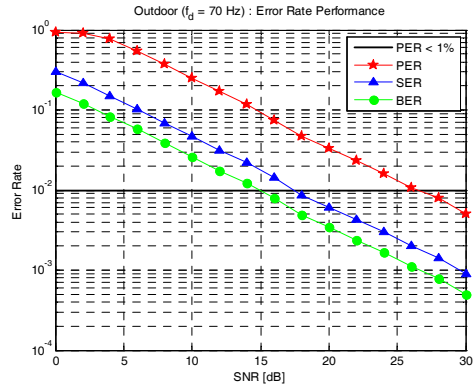


그림 16. 최대 도플러 주파수가 70Hz인 옥외 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 에러율  
Fig. 16. Error rate of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the outdoor channel environment with maximum doppler frequency of 70Hz.

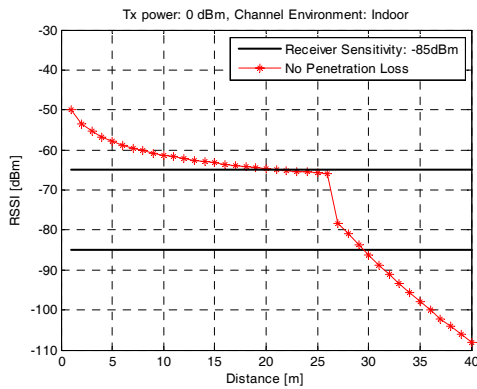


그림 15. 옥내 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 RSSI  
Fig. 15. RSSI of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the indoor channel environment.

감지할 수 있으며, 이를 기준으로 최대 29m까지 송신된 신호를 감지할 수 있다.

#### 나. 옥외 채널 환경

그림 16과 그림 17은 각각 옥외 채널 환경에서 최대 도플러 주파수가 70Hz, 155Hz인 시변 주파수 선택적 채널의 에러율 성능을 나타낸다. PER이 1% 미만인 것이 위하여 SNR이 약 27dB 이상 요구된다.

그림 18은 옥외 채널 환경에서의 RSSI 성능을 나타낸다. 수신 전력이 -85dBm 이상일 때 수신된 신호를 감지할 수 있으며, 이를 기준으로 최대 185m까지 송신된 신호를 감지할 수 있다.

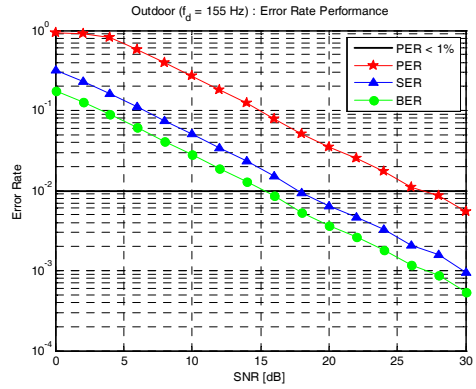


그림 17. 최대 도플러 주파수가 155Hz인 옥외 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 에러율  
Fig. 17. Error rate of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the outdoor channel environment with maximum doppler frequency of 155Hz.

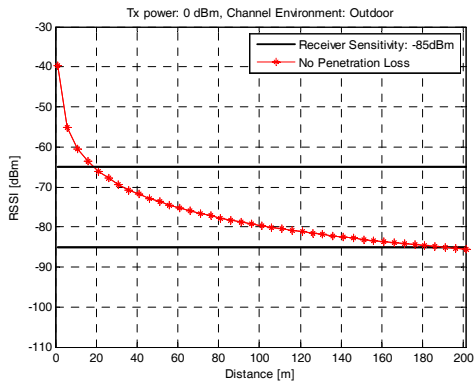


그림 18. 옥외 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 RSSI  
Fig. 18. RSSI of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the outdoor channel environment.



2. 철도 채널 환경

가. 저속 채널 환경

그림 19와 그림 20은 각각 저속 철도 채널 환경에서 최대 도플러 주파수가 155Hz, 300Hz인 시변 주파수 선택적 채널의 에러율 성능을 나타낸다. PER이 1% 미만 이 되기 위하여 SNR이 약 32dB 이상 요구된다.

그림 21은 저속 철도 채널 환경에서의 RSSI 성능을 나타낸다. 수신 전력이 -85dBm 이상일 때 수신된 신호를 감지할 수 있으며, 이를 기준으로 투과 손실이 0dB일 때 최대 40m, 20dB일 때 최대 4m, 32 dB일 때

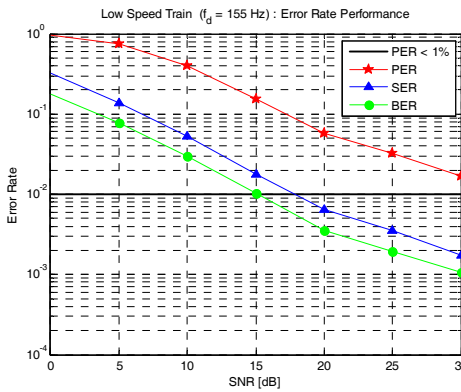


그림 19. 최대 도플러 주파수가 155Hz인 저속 철도 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 에러율

Fig. 19. Error rate of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the low speed train channel environment with maximum doppler frequency of 155Hz.

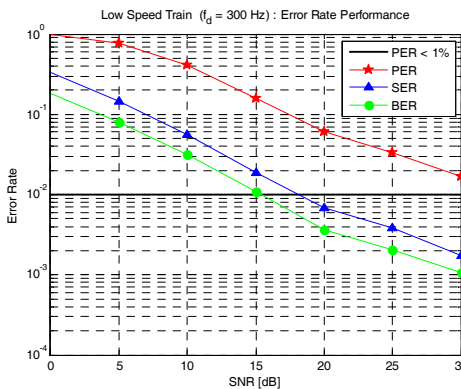


그림 20. 최대 도플러 주파수가 300Hz인 저속 철도 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 에러율

Fig. 20. Error rate of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the low speed train channel environment with maximum doppler frequency of 300Hz.

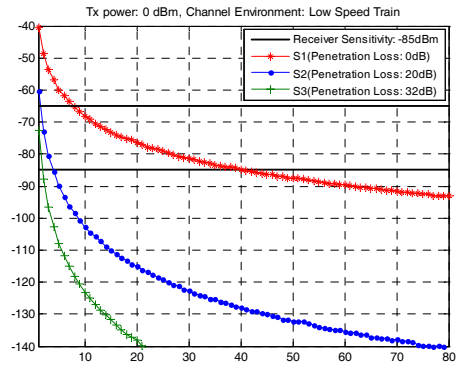


그림 21. 저속 철도 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 RSSI

Fig. 21. RSSI of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the low speed train channel environment.

최대 2m까지 송신된 신호를 감지할 수 있음을 확인할 수 있다.

나. 고속 채널 환경

그림 22와 그림 23은 각각 저속 철도 채널 환경에서 최대 도플러 주파수가 780Hz, 960Hz인 시변 주파수 선택적 채널의 에러율 성능을 나타낸다. 약 30dB에서 Overflow가 발생하여 PER이 1% 미만을 만족시킬 수 없다.

그림 24는 고속 철도 채널 환경에서의 RSSI 성능을 나타낸다. 수신 전력이 -85dBm 이상일 때 수신된 신호를 감지할 수 있으며, 이를 기준으로 투과 손실이

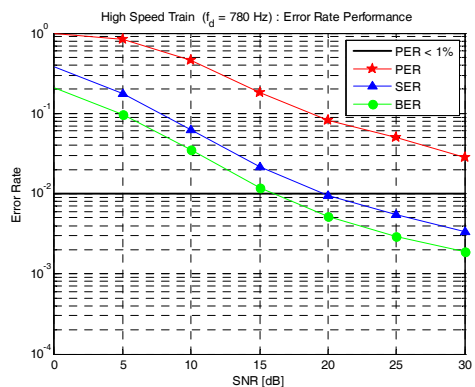


그림 22. 최대 도플러 주파수가 780Hz인 고속 철도 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 에러율

Fig. 22. Error rate of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the high speed train channel environment with maximum doppler frequency of 780Hz.

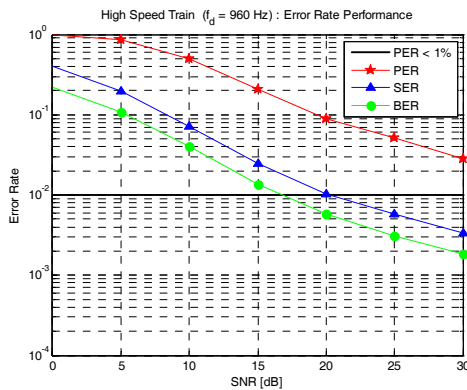


그림 23. 최대 도플러 주파수가 960Hz인 고속 철도 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 에러율

Fig. 23. Error rate of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the high speed train channel environment with maximum doppler frequency of 960Hz.

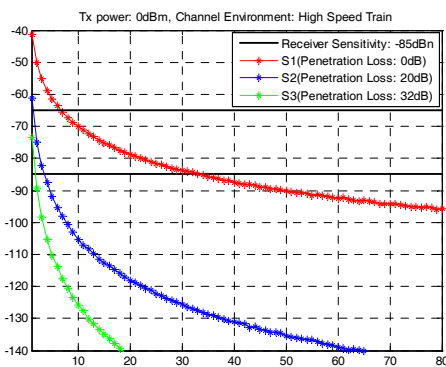


그림 24. 고속 철도 채널 환경에서 IEEE 802.15.4/ZigBee 시스템의 RSSI

Fig. 24. RSSI of IEEE 802.15.4/ZigBee system in the high speed train channel environment.

0dB일 때 최대 33m, 20dB일 때 최대 3.5m, 32dB일 때 최대 1.8m까지 송신된 신호를 감지할 수 있음을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 옥내 및 옥외에 대한 일반 채널, 저속 및 고속 철도 채널 환경에 대하여 IEEE 802.15.4 전파 전파 특성분석 후 채널 모델을 제안하고 모의실험을 통해 성능을 분석하였다.

모의실험 결과 일반채널 및 저속 철도 채널 환경에서는 PER이 1% 미만으로 떨어지는 것을 확인하였다. 하

지만 고속 철도 채널 환경에서는 Overflow가 발생하여 PER이 1%미만을 떨어지지 않는 것을 확인하였다. 또한 RSSI 성능 분석에서는 일반채널 및 철도 채널 환경에서 시나리오 1의 경우 수신 감도가 -85dBm을 만족하는 최대거리가 상대적으로 멀지만 철도 채널 환경에서 시나리오 2와 3의 경우 열차 프레임으로 인한 투과 손실이 발생하여 수신 감도가 -85dBm을 만족하는 최대거리가 상대적으로 매우 짧다는 것을 확인하였다.

향후 연구 과제로 고속 철도 채널 환경에서 Overflow 발생으로 인한 에러율과 철도 채널 환경에서 투과 손실로 인한 RSSI 문제를 해결할 수 있는 방안을 찾는 것을 고려할 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- [1] 이승열, 김동순, 김현식, 정덕진, “유비쿼터스 센서 네트워크를 위한 IEEE 802.15.4 LR-WPAN 2.4GHz 베이스 밴드 설계 및 검증”, 전자공학회지, 제 43권, TC편, 제 1호, 49~56쪽, 2006년 1월
- [2] 강세일, “홈네트워크 해외 표준화 기관 추진 현황”, Tech & Market 홈네트워크 서비스 및 기술 동향, HN Focus, Vol 16, 2007, 6.
- [3] IEEE Standard for Information technology, “IEEE 802.15.4 Specific requirements part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN)”, IEEE standard, Oct. 2003.
- [4] 윤성록, 서상호, 최호석, 황용석, 유형준, 박신중, “ZigBee : 저속-저가-저전력의 무선 통신 기술”.
- [5] [http://www.lapis-semi.com/en/semicon/telecom/zig\\_bee.htm](http://www.lapis-semi.com/en/semicon/telecom/zig_bee.htm)
- [6] ITU-R M.1225 International Telecommunication Union, “Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000, 1997.
- [7] Ji Hoon Yoo, Jae Hyoung Lee, Sung Ho Cho, “A Propagation Model in 2.4GHz ISM Band Using IEEE 802.15.4 Systems”, 17th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Oct. 2011
- [8] <http://m2m.icpdas.com/application.html>
- [9] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169907002438>
- [10] 3GPP TS 36.211: “E-UTRA; Physical Channels and Modulations”, v9.1.0, March 2010.
- [11] 조용수, 김재권, 양원영, “MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB”, Hongreung

Science Publishing, 2008.

[12] Doru Suciu, "A STUDY OF RF LINK AND COVERAGE IN ZIGBEE", Scientific Bulletin of the Petru Major University of Targu Mures, Vol.7 no. 1, 2010.

저 자 소 개



**문 상 미**(학생회원)  
2012년 2월 전남대학교  
전자컴퓨터공학부 학사  
2012년 3월~현재 전남대학교  
전자컴퓨터공학과 석사과정  
<주관심분야 : 이동통신, ICIM>



**김 보 라**(학생회원)  
2012년 2월 전남대학교  
전자컴퓨터공학부 학사  
2012년 3월~현재 전남대학교  
전자컴퓨터공학과 석사과정  
<주관심분야 : 이동통신, CoMP>



**사란쉬 말리크**(학생회원)  
2010년 라지프 간디 공과대학  
IT학과 학사  
2013년 2월 전남대학교 전자  
컴퓨터공학과 석사  
2012년 3월~현재 전남대학교  
전자컴퓨터공학과  
박사과정

<주관심분야 : MIMO, OFDM, Relay>



**김 영 일**(정회원)  
1985년 경희대학교 전자공학 학사  
1988년 경희대학교 전자공학 석사  
1996년 경희대학교 전자공학 박사  
1988년~현재 ETRI 모바일미디어  
응용기술연구소  
1994년 정보통신기술사,

1995년 전기통신기술사  
2007년 MUST(Mongolian University of Science and Technology) 명예교수  
2007년 과학기술연합대학원대학교(UST) 겸임교수  
2008년 한밭대학교 겸임교수, 북경교통대(Beijing Jiaotong University) 교문교수  
<주관심분야 : PHY/MAC layer and system architecture of mobile IPTV system based on WiMax/WiBro system>



**여 건 민**(정회원)  
1995년 포항공과대학교  
산업공학 학사  
1987년 포항공과대학교  
산업공학 석사  
2001년 포항공과대학교  
산업공학 박사

2001년~ 현재 ETRI 모바일미디어응용기술연구소  
<주관심분야 : 이동통신(트래픽, 확률모델), 무선  
패킷 스케줄링, 큐잉이론>



**김 대 진**(평생회원)  
1984년 서울대학교  
전자공학과 학사  
1986년 한국과학기술원  
전기 및 전자공학과 석사  
1991년 한국과학기술원  
전기 및 전자공학과 박사

1991년 7월 1996년 12월 LG전자 멀티미디어연구  
소 책임연구원  
1997년~현재 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수  
<주관심분야 : 디지털 통신, 디지털 방송>



**황 인 태**(평생회원)  
1990년 2월 전남대학교  
전자공학과 학사  
1992년 8월 연세대학교  
전자공학과 석사  
1999년 9월~2004년 2월  
연세대학교  
전기전자공학과 박사

1992년 8월~2006년 2월 LG전자 책임 연구원  
2006년 3월~현재 전남대학교 전자컴퓨터공학부  
교수

<주관심분야 : 디지털통신, 무선통신시스템, 차세대이동통신, MIMO, OFDM, MIMO-OFDM, Relay, ICIM, CoMP, MTC>