

# 실내 및 실외 100m 거리에서 64-QAM OFDM 무선광통신 테스트베드 기반 실측 성능 비교

김종민\*, 이주형\*, 고영채<sup>o</sup>

## Experimental Results of 100m Indoor and Outdoor FSO Testbed Employing 64-QAM OFDM

Jong-Min Kim\*, Ju-Hyung Lee\*, Young-Chai Ko<sup>o</sup>

### 요약

기존 RF (Radio Frequency) 통신과 다르게 무선광통신은 주파수 사용권 제한이 없어 Tbps급 초고속 통신을 저비용 고효율로 이뤄낼 수 있는 차세대 기술로 주목받고 있다. 해외에서는 6세대 통신 핵심기술로 무선광통신 시스템의 실험적 증명이 널리 연구되고 있음에도, 국내에서는 여전히 실측 연구 사례가 없다. 본 연구에서는 무선광전송 테스트베드 구축 시스템을 소개하고 이를 이용하여 64-QAM OFDM 전송을 통한 실내 및 실외에서 실측한 성능을 비교한다. 베이스밴드 신호로서 USRP (Universal Software Radio Peripheral) 가 사용하였으며 레이저 다이오드를 통해 1550nm 광신호로 변환하였다. 본 연구에서 1) 실내 복도환경과 2) 실외 환경에서 수신된 광신호의 EVM (Error vector magnitude) 을 측정하였으며, 그 결과 실내는 7dBm, 실외는 11dBm의 송신 레이저 파워 이상에서 802.11a 무선 랜 표준이 요구한 EVM 한계를 만족하고 비트 에러 오류율 (Bit error rate, BER)이 10e-5 이하를 달성하며 수신에 성공함을 확인하였다. 국내 최초로 실내외 100m 송수신 테스트를 성공한 해당 테스트베드는 무선광통신이 기존 무선랜 기반 장비를 연결하는 무선 백홀링크로 안정적으로 사용될 수 있음을 보인다.

**키워드** : 무선광통신, FSO, 비동기 검파식, 직교 주파수 분할 다중화

**Key Words** : Free Space Optical Communication, FSO, Non-coherent, OFDM

### ABSTRACT

Unlike the RF communication, the free space optical (FSO) communication has remarkable advantages, which are no frequency license issues, low-cost and high power efficiency. Even though there are various researches on the FSO systems abroad, no experimental demonstrations have been conducted in South Korea. In this work, we implement a FSO experiment and analyze the performance of our FSO testbed employing 64-QAM OFDM over 100m indoor and outdoor environments. In our FSO testbed, two USRPs are used for RF signal generation and reconstruction. The RF signal is converted into 1550nm laser signal by an optical intensity modulator and changed into RF signal again by a photodetector. We measure EVM and BER of the received signals in 1) indoor corridor and 2) outdoor environment. As a result, our FSO testbed shows BER below 10e-5. This testbed, which firstly succeeded 100m FSO transmission for indoor and outdoor conditions in Korea, validates the FSO system is a promising alternative for backhaul link connecting in-between the wireless local area network (WLAN)-based conventional network infrastructure.

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020R1A4A1019628).

• First Author : School of Electrical Engineering, Korea University, botboy0441@korea.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Korea University, koyc@korea.ac.kr, 중신회원

\* Research Institute for Information & Communication & Technology, Korea University, leejuhjung@korea.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202108-220-D-RN, Received August 30, 2021; Revised November 19, 2021; Accepted November 23, 2021

## 1. 서 론

최근 수십 년간 인터넷 통신량은 지속적으로 증가했다. 그로 인해 폭발적인 통신량 수요를 해소하기 위한 기술 개발은 현재 가장 큰 이슈 중 하나이다. 기존에 사용하고 있는 RF 통신은 주파수 사용권 문제로 고속 통신에 제한이 있다. 반면에 무선광통신은 주파수 사용권 문제없이 충분한 대역폭을 사용할 수 있어 RF 통신의 문제점을 해결하는 기술로 주목받고 있다<sup>[1]</sup>. 무선광통신은 빔 너비가 좁은 레이저 통신으로, 장거리 통신을 할 때 적은 송신 파워로도 높은 신호 대 잡음비 (Signal to noise ratio, SNR)을 얻을 수 있으며 타 사용자의 전파 탐지가 어려워 보안이 우수한 장점이 있다<sup>[2]</sup>.

현재까지 여러 연구에서 무선광통신의 우수한 성능에 대한 실험적 분석이 있었다. [3]에서는 25GHz의 32-QAM (Quadrature amplitude modulation) 신호를 파장 분할 다중화 (Dense wavelength division multiplexing, DWDM) 기법으로 생성하여 총 1.08Tbps 속도의 100m 무선광통신 실험을 진행했다. [3]에서 진행한 실험은 무선광통신 기반 통신장치에서 실제로 Tbps 급 초고속 통신이 가능함을 보여준다. [4]와 [5]에서는 -QAM 신호를 무선광통신 테스트베드를 통해 송수신하고 EVM 성능을 분석하였는데, 두 연구 모두 약 -25dB의 우수한 결과를 얻었다. 이 결과로부터 무선광통신이 단순히 고속 통신의 장점만 가지는 것이 아니라 고급 변조 기법을 이용하면서도 낮은 에러율을 가지는 것이 가능함이 실험적으로 증명되었다.

한편, 무선광통신이 널리 보급되지 못하는 중요한 이유 크게 두 가지이다. 첫 번째로, 레이저 빔의 강한 직진성으로 송수신단 사이에 직진 채널 환경 (Line of sight, LOS)이 반드시 보장되어야 한다. 무선광통신에서 주로 사용되는 전자기파의 파장은 1550nm의 단파적외선 대역이다. 해당 파장은 안개와 구름 등 날씨에 의한 감쇠 효과가 커 대기 조건에 따라 아웃티지가 발생할 확률이 존재한다. 그러나 [6]에서는 한국의 옥외 무선광통신 시스템의 링크 가용성을 연간 날씨자료를 토대로 분석하였다. 그 결과, 대전에서는 최대 95%까지의 가용성을 예측하며 국내의 무선광통신 활용 효율성을 확인했다. 두 번째 이유는 좁은 레이저 빔 너비로 인한 송수신단 사이 정교한 빔 정렬이 필수적인 것이다. 무선광통신 시스템의 빔 정렬 과정은 ATP (Aquisition, tracking and pointing)라고 하며 ATP를 자동화하기 위해서는 고가의 장비와 첨단 기술력을

필요로 한다. [7]에서는 현재 사용되는 짐벌 기반 또는 FSM (Fast steering mirror) 기반의 ATP 기술을 조사하였는데, 빠른 속도로 움직이는 물체들 사이 빔 정렬 및 추적에는 여전히 현존하는 기술로는 구현이 어려움을 알 수 있다.

이처럼 무선광통신이 혁신적인 장점들로 5세대 통신에 이어 6세대 통신의 주요 기술로 주목받고 있음에도 국내에서는 장거리 무선광통신 테스트베드를 구축한 사례가 없었다. 따라서, 본 연구에서는 직교 주파수 분할 다중화(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 기반의 100m 실내의 무선광통신 테스트베드를 국내 최초로 구축하고 EVM과 BER 성능을 분석했다. 본 테스트베드는 USRP를 이용해 생성된 4, 16, 64-QAM의 의 OFDM신호를 1550nm 파장의 광신호로 전환하는 무선광통신 시스템이다. 모든 통신은 802.11a 무선랜 표준에 의거한 변조 코딩 구성 (modulation coding scheme, MCS)으로 이루어졌으며, 준비된 이미지 파일을 실내의 100m 거리에서 성공적으로 송수신하였다. 이는 국내에서 진행한 최초의 장거리 무선광통신 실험이다.

표 1에는 무선광통신 테스트베드 연구의 해외 사례를 정리하고 본 논문에서 구성한 테스트베드와 각 성능지표를 비교하였다. 해당 해외 선행 연구들은

표 1. 선행 FSO 테스트베드 연구 간 비교표  
Table 1. Comparison of FSO demonstrations (CC; Convolutional Coding, PM; Polarization Multiplexing)

	[8]	[3]	[9]	This paper
Data rate (bps)	112 × 10 <sup>9</sup>	1.08 × 10 <sup>12</sup>	2.208 × 10 <sup>12</sup>	27 × 10 <sup>6</sup>
Channel Coding	-	-	-	3/4 CC
Spectral efficiency (b/s/Hz)	32	3.6	7.2	4.52
Total Bandwidth (Hz)	50 × 10 <sup>9</sup>	300 × 10 <sup>9</sup>	300 × 10 <sup>9</sup>	10 × 10 <sup>6</sup>
Optical Channel Spacing	-	0.2nm, 12 channels	0.2nm, 12 channels	-
FSO Link Length (m)	120	100	11.5	100
Environment	Outdoor	Outdoor	Outdoor	Outdoor
Modulation	QPSK	32-QAM	16-QAM	64-QAM OFDM
Technique	PM	Super-channel DWDM	Super-channel DWDM	802.11a WLAN

DWDM 기법을 이용해 다수의 채널을 생성하고 넓은 대역폭을 활용하여 Tbps급 초고속 전송 실험을 진행했다. 이와 비교하여 본 연구에서 구축한 테스트베드는 802.11a 무선랜 표준에 기반하여 변복조된 이미지 파일을 실제 송수신하는 실험이며, 해외 선형 연구들과 전송 속도와 채널의 대역폭 성능에서 차이가 나는 이유는 디지털 프로세싱을 위한 USRP 장비의 최대 대역폭 제한 때문이다. 본 실험 결과로부터 기존에 사용되던 고급 RF 디지털 처리 기법이 무선 광 채널을 통해 문제없이 적용됨을 검증하였으며, 향후 연구에서는 자동화된 ATP 시스템을 갖추고, WDM 기법을 적용해 고속 전송 속도를 달성하는 완성형 무선광통신 테스트베드를 구축하는 연구가 함께 진행될 계획이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II에서는 RF 데이터 신호 생성 방법과 무선 광 검출 기법 및 광학 렌즈 설계에 대하여 설명한다. 그리고 III에서는 본 연구에서 제시하는 무선광통신 테스트베드의 송신단과 수신단 설계 및 장거리에서의 빔 정렬 방법에 대하여 설명한다. IV에서는 테스트베드 시연을 통해 BER 계산 및 성능 분석을 진행하며 마지막으로 V에서 결론으로 마무리된다.

## II. 무선광통신 시스템 모델 설계

본 실험의 블록 다이어그램은 그림 1에서 볼 수 있다. 1차로 RF 대역의 전기신호를 생성하면 2차로 광 신호로 변환하여 레이저 빔의 형태로 대기 중으로 전송되며 수신단에서는 광신호를 다시 RF 전기신호로 변환하여 데이터 복원 단계를 거친다. 구체적인 데이터 생성과 복원과정은 다음과 같다.

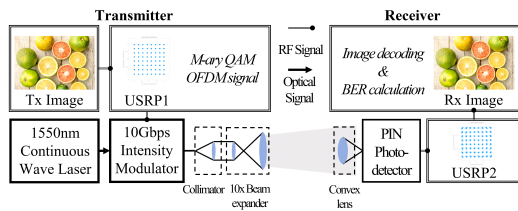


그림 1. 무선광통신 테스트베드 블록 다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of FSO testbed

### 2.1 USRP를 이용한 OFDM 신호 생성

본 실험에서는 802.11a 무선랜 표준 기반의 OFDM 신호가 RF 전기신호로 생성된다. 구체적인 패킷 프레임은 [10]을 참고하여 그림 2처럼 설계했다. RF 전기신호 생성을 위해 USRP (NI USRP-2940R)을 사용하

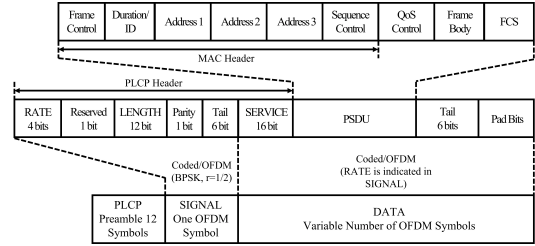


그림 2. 802.11a 무선랜 표준 패킷 프레임  
Fig. 2. Packet frame of 802.11a WLAN standard

고, 전송되는 데이터는 미리 준비된 이미지 파일이다. 해당 파일은 매트랩을 이용해 비트로 변환되고 802.11a 무선랜 표준에 따라 3/4 코딩율의 컨볼루션 부호화 된 다음 MCS 숫자 3, 5, 7에 해당하는 QPSK, 16-QAM, 64-QAM의 OFDM 신호로 변환된다. OFDM 신호는 중심 주파수 100MHz와 대역폭 10MHz를 가지고 64개의 부 반송파를 사용한다. 이때, 본 실험에서는 송신단과 수신단의 패킷 동기화를 위해서 송신단에서는 반복적으로 데이터를 전송하고 수신단에서는 첫 패킷부터 마지막 패킷이 모두 수신될 때까지 대기하도록 설계했다. 수신단에서는 지정된 MCS 번호에 따라 모든 수신 패킷의 EVM을 계산한다. 측정된 EVM을 통해 다음식으로부터 BER을 계산할 수 있다<sup>[11]</sup>.

$$P_b \approx \frac{4}{\log_2 M} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left( \sqrt{\frac{3}{(M-1)EVM_{RMS}^2}} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서  $M$ 은 QAM 변조 기법의 심볼 개수를 의미하고  $EVM_{RMS}$ 는 측정된 EVM의 평균 제곱 제곱근 (Root mean square, RMS)를 의미한다. 따라서 매 실험에서 얻어지는 EVM을 통해 BER 값을 계산할 수 있으며 802.11a 표준에서 제시하는 EVM 한계치와 비교해 객관적인 성능을 분석했다. 송신단 USRP의 RF 신호 파워는 13dBm으로 설정하고, 수신단 USRP의 RF 증폭 이득은 약 28.5dB로 설정하였다. 본 실험에서는 별도의 RF 증폭기는 사용하지 않았다.

### 2.2 비동기 검파식 광 세기 변복조 기법

본 실험에서는 USRP에서 생성된 RF 신호가 1550nm 파장의 레이저가 가지는 광 세기의 변화로 직접 변환된다. 외부의 CW (Continuous Wave) 레이저 소스에서 출력되는 일정한 세기의 레이저 빔은 광 모듈레이터를 통해 USRP에서 생성되는 RF 신호로

광 세기 변조된다. 그림 3은 비동기 검파식 광 세기 직접 검출 방식을 나타냈다. 수신단의 광 검출기를 거쳐 얻어지는 RF 전기신호  $y$ 는 아래 수식으로 표현된다<sup>12)</sup>.

$$y = \eta h x + n \quad (2)$$

식 (2)에서  $h$ 는 대기 채널에 의한 감쇠율,  $n$ 는 전송된 RF 전기신호를 떠나내고  $n$ 은 AWGN (addictive white gaussian noise),  $\eta$ 는 광 검출기의 광-전기신호 변환 이득이다.

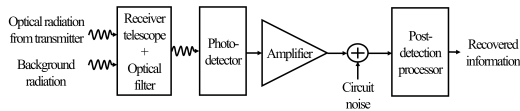


그림 3. 비동기 검파식 광 세기 직접 검출 방식  
Fig. 3. Non-coherent intensity modulation direct detection

### 2.3 레이저 빔의 대기 채널 전파 모델

무선광통신에서 송신단의 빔 출력은 레이저 빔의 대표적인 모델링인 가우시안 빔 형태를 따른다. 그림 4에서  $w(z)$ 는 거리  $z$ 에서의 가우시안 빔의 너비로 빔의 세기가 최대 세기의 약 13.5%인 범위로 정의된다. 수식은 다음과 같이 표현된다<sup>13)</sup>.

$$w_z = w_0 \left( 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

$w_0$ 는  $z=0$ 에서 빔 크기를 의미하며,  $\lambda$ 는 빔의 파장을 나타낸다. 식 (3)으로부터 가우시안 빔의 발산각은  $\theta = \lambda/\pi w_0$ 으로 유도되고 장거리 통신일수록 빔의 발산에 의한 기하학적 손실을 막기 위해  $w_0$ 을 키우도록 설계한다. 본 실험에서는 무선광통신에서 안테나에

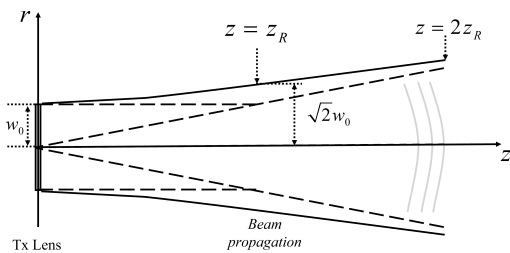


그림 4. 거리  $z$ 에 따른 가우시안 빔의 빔 너비  $w(z)$   
Fig. 4. Gaussian beam width  $w(z)$  according to the distance  $z$

해당하는 광학 렌즈를 그림 1처럼 빔 시준기와 빔 익스펜더를 이용하여 약 3cm 너비의 빔이 방사되도록 설계했다.

## III. 무선광통신 테스트베드 설계

### 3.1 송신단 설계

서울에 소재한 건물 실내와 실외 환경에서 100m 거리의 무선광통신 송신단과 수신단 한 쌍을 배치하였다. 이동식 송수신단을 구현하기 위해 2개의 랩 케이스를 제작하였다. 그림 5에서는 송신단의 모습을 볼 수 있다. CW laser (Thorlabs PRO800)를 통해 출력된 일정한 세기를 가지는 1550nm 파장의 광신호는 10Gbps 대역폭을 가지는 광 세기 변조기 (SUMITOMO T.MXH.1.5-10PD-ADC-LV)를 통해 USRP1에서 생성되는 신호로 광 세기 변조된다. 시준기 (Thorlabs CFS18-1550-APC)를 통해 시준된 빔은 100m 장거리 통신을 위해 10x 빔 익스펜더 (Thorlabs GBE10-C/2)로 빔 크기가 한 번 더 증폭된다. 이때, 외부 광 세기 증폭기는 사용하지 않았다.

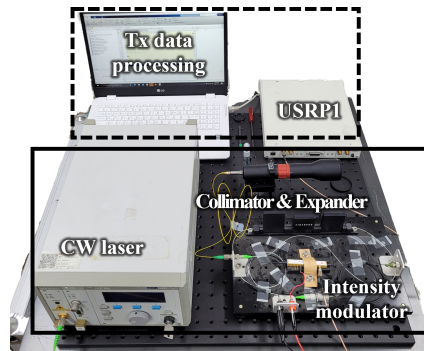


그림 5. 무선광통신 테스트베드 송신단  
Fig. 5. Transmitter of FSO testbed

### 3.2 수신단 설계

수신된 빔은 지름 50mm, 초점거리 50mm를 가진 플라노 볼록 렌즈를 통해 35MHz 광 검출기(Thorlabs DET10C2)로 조준된다. 광 검출기는 광 신호를 RF 전기신호로 변환하고 USRP와 매트랩은 수신된 데이터 패킷을 읽어 데이터를 복원한다. 매트랩 프로그램은 수신된 패킷들의 Uncoded 데이터의 EVM을 측정하며 수신된 이미지를 다시 복원하여 원본 이미지와 Encoded 데이터의 비트 에러율을 계산한다. 그림 6에서는 수신단의 모습을 볼 수 있다.



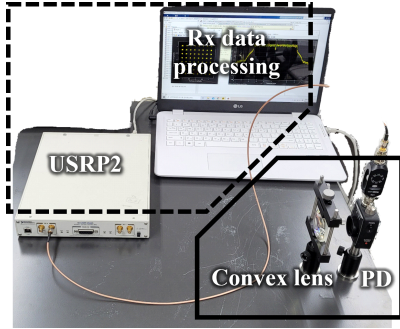


그림 6. 무선광통신 테스트베드 수신단  
Fig. 6. Receiver of FSO testbed

### 3.3 실험 환경 설정 및 빔 정렬 과정

표 2에는 주요 실험 환경 변수를 정리하였다. 실내 100m 거리에서는 그림 7처럼 송수신단으로부터 50m 지점에 거울을 설치하고 반사되는 빔을 이용해 실험하였다. 실외에서 실험할 당시 날씨는 맑았고 평균풍속 1.8km/h, 기온은 영하 4.6도였다.

그림 8은 100m 거리의 송수신단 사이 빔 정렬 과정을 나타냈다. 5cm 이하의 빔을 100m 거리에서 정교하게 조준하기 위해서 900nm~1700nm 단파적외선 (Short wave infrared, SWIR)을 촬영하는 적외선 카메라를 사용했다. 단파적외선 카메라와 오실로스코프

표 2. 주요 실험 환경 변수  
Table 2. Key experiment parameters

The data conditions	
No. of subcarriers	64
Center frequency	100MHz
Channel bandwidth	10MHz
Channel coding	3/4 CC
Modulation	QPSK (MCS=3), 16-QAM (MCS=5), 64-QAM (MCS=7)
USRP Tx power	13dBm
USRP Rx gain	28.5dB
Tx laser power	3dBm~13dBm
Wavelength	1550nm
The Outdoor Environment	
Visibility	20km
Temperature	-4.6℃
Average wind speed	1.8km/h
The EVM limit of 802.11a standard [10]	
QPSK (MCS=3)	-13dB
16-QAM (MCS=5)	-19dB
64-QAM (MCS=7)	-25dB

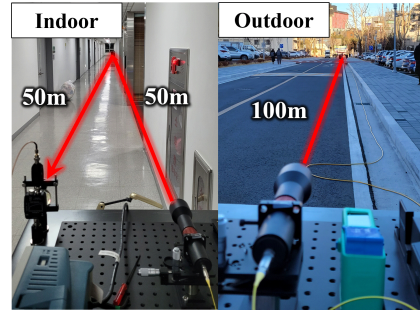


그림 7. 실내외 100m 거리 송수신 설치  
Fig. 7. Transmitter and receiver at the distance of 100m

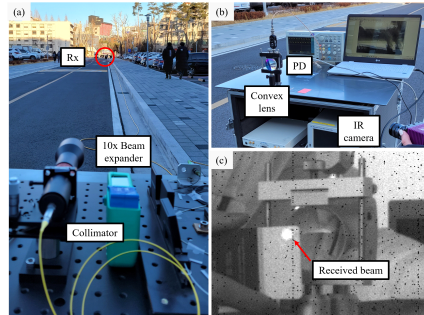


그림 8. 실외 100m 무선광통신 : (a) 송신단 (b) 수신단 (c) 적외선 카메라로 촬영한 수신된 빔  
Fig. 8. 100m outdoor transmission: (a) the transmitter-side (b) the receiver-side and (c) the received beam taken by the IR camera

를 동시에 확인하며 수동으로 빔 정렬을 맞추었다. 그림 8의 (c)에서 단파적외선 카메라로 촬영한 수신 빔의 모습을 확인 할 수 있다. 송신단의 빔 시준기를 2축 스테이지와 결합하여 실시간으로 확인되는 빔의 위치를 보며 빔의 위치를 조정하였다.

## IV. 실내외 100m 무선광통신 실험 결과

그림 9는 실내외 100m 실험에서 64-QAM OFDM 신호를 송수신하였을 때 3dBm과 11dBm의 레이저 송신 파워에서 수신된 신호 성장도를 나타냈다. 실내외 모두 11dBm의 레이저 파워에서 표 2에 표시된 EVM 기준치를 넘지 않았다. 그러나 3dBm의 레이저 파워에서는 EVM 기준치를 넘었으며 특히 실외 3dBm의 신호 성장도에서는 심한 왜곡이 있음을 알 수 있다.

그림 10은 실내 100m 실험에서 매 2dBm 송신 레이저 파워마다 수신된 패킷들의 평균 EVM 제공 평균 제공근 수치를 QPSK, 16-QAM, 64-QAM에 따라 나타냈다. 실내외의 경우 레이저 파워 5dBm 이하의

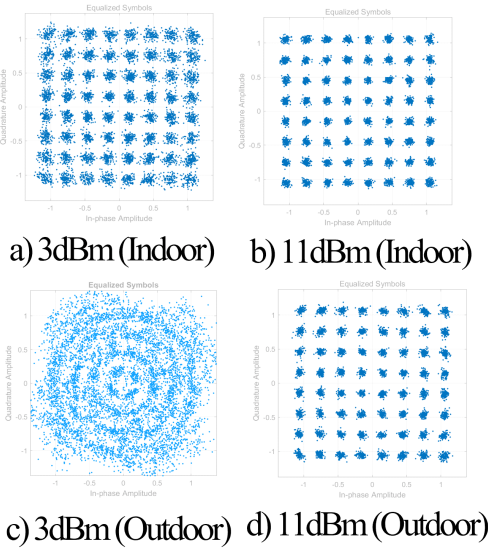


그림 9. 송신 레이저 세기에 따른 수신 64-QAM 신호 성상도 a) 3dBm, 실내 b) 11dBm, 실내 c) 3dBm, 실외 d) 11dBm, 실외  
 Fig. 9. Received 64-QAM constellation graph according to the Tx laser power a)3dBm, indoor b) 11dBm, indoor c) 3dBm, outdoor d) 11dBm, outdoor

64-QAM에서 EVM 한계치를 초과했다. 실외의 경우 레이저 파워 3dBm 이하의 16-QAM과 9dBm 이하의 64-QAM에서 EVM 한계치를 초과했다. 이를 제외한 모든 경우에는 모두 평균 EVM 제공 평균 제공근 수치가 802.11a에서 요구하는 EVM 한계보다 낮았다. 그림 11은 그림 10에 대응되는 비트 에러 오류율을 식 (1)을 이용해 계산했다. 그림 11에서 알 수 있듯, EVM 기준치를 초과한 16, 64-QAM의 일부 경우를 제외하면 모두  $10e-5$  이하의 낮은 비트 에러 오류율이 얻어졌다.

본 실험을 진행할 때 BER 성능저하의 주된 요인은 빔 포인팅 에러와 대기 채널에 의한 감쇠 효과였다. 빔 포인팅 에러는 특히 야외에서 강한 바람으로 인해 더 심한 영향을 미쳤는데 본 실험 장비에는 진동에 의한 감쇠를 상쇄하는 자동화된 ATP 장비가 없으므로 BER 성능저하 요인이 되었다. 본 실험에서는 채널 모델링 및 분석은 진행하지 않았다. 그러나 실험이 영하의 날씨에 강한 바람 속에서 진행된 점을 고려할 때 대기 난기류에 의한 빛의 세기 감쇠 또한 야외 실험 결과에 BER을 높이는 요인이 되었음을 알 수 있다. 실험 결과를 종합할 때, 그림 11에서 얻어진  $10e-5$  이하의 낮은 BER 값으로부터 -QAM OFDM 기반 무선 광통신 테스트베드가 낮은 어려움을 가지면서 실내뿐

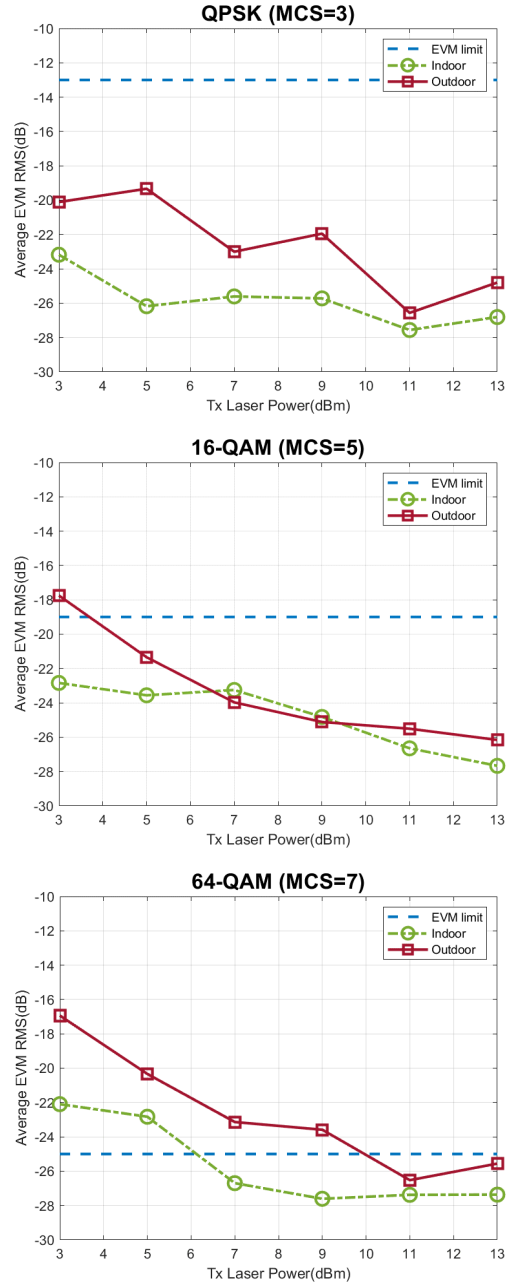


그림 10. 실내외 100m 실험의 평균 EVM 제공 평균 제공근  
 Fig. 10. The 100 indoor and outdoor transmission average EVM root mean square

만 아니라 실외에서도 신뢰성있는 통신 시스템으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 특히 이는 국내에서 무선광통신 테스트베드를 구축한 최초의 사례로서 의미가 있다.

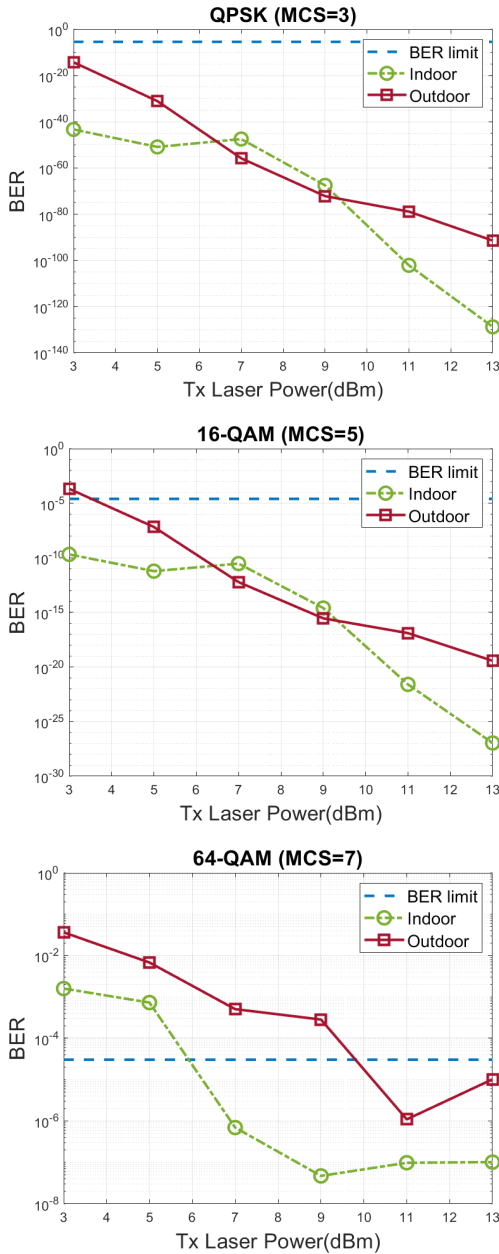


그림 11. 실내외의 100m 실험 비트 에러 오류율  
Fig. 11. The 100 indoor and outdoor transmission bit error rate

### V. 결론

본 연구에서는 실내외 환경에서 64-QAM OFDM 을 적용한 100m 무선광통신 실험을 진행했다. 802.11a 무선랜 표준의 3, 5, 7번 MCS에 해당하는 QPSK, 16-QAM, 64-QAM에서 송신 레이저 파워를

2dBm 씩 증가시키며 평균 EVM 제곱 평균 제곱근 수치를 측정하고, 이를 통해 16, 64-QAM의 일부 경우를 제외하면 10e-5 수준의 비트 에러 오류율을 얻을 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 실험을 통해 무선광통신이 높은 EVM 마진을 가지면서 기존의 RF 통신 방식과 함께 무선 백홀 링크로 활용 가능함을 확인하였다. 해당 테스트베드는 국내에서 무선광통신을 RF 통신장비와 호환 구현한 최초 실험 사례이다.

### References

- [1] A. Mostafa and S. Hranilovic, "In-field demonstration of OFDM-Over-FSO," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 8, pp. 709-711, Apr. 2012.
- [2] S. A. Al-Gailani, et al., "A survey of free space optics (FSO) communication systems, links, and networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 7353-7373, 2021.
- [3] M. A. Esmail, A. Ragheb, H. Fathallah, and M. Alouini, "Investigation and demonstration of high speed full-optical hybrid fso/fiber communication system under light sand storm condition," *IEEE Photon. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 1-12, Feb. 2017.
- [4] H. K. Al-Musawi, et al., "Experimental demonstration of transmitting LTE over FSO for in-building POF networks," *2015 17th ICTON*, Budapest, 2015.
- [5] D.-N. Nguyen, L. Vallejo, J. Bohata, B.Ortega, Z. Ghassemlooy, and S. Zvanovec, "Wideband QAM-over-SMF/turbulent FSO downlinks in a PON architecture for ubiquitous connectivity," *Opt. Commun.*, vol 475, 2020.
- [6] V. V. Mai, D. T. Ha, and H. Kim, "Link availability of terrestrial free-space optical communication systems in Korea," *Korean J. Opt. Photon.*, vol. 29, no. 2, pp. 77-84, Apr. 2018.
- [7] Y. Kaymak, R. Rojas-Cessa, J. Feng, N. Ansari, M. Zhou, and T. Zhang, "A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications," *IEEE Commun. Surv.*

*Tutor.*, vol. 20, no. 2, pp. 1104-1123, Secondquarter 2018.

- [8] N. Cvijetic, D. Qian, J. Yu, Y. Huang, and T. Wang, "100 Gb/s per-channel free-space optical transmission with coherent detection and MIMO processing," *2009 35th Eur. Conf. Opt. Commun.*, 2009.
- [9] M. A. Esmail, A. Ragheb, H. Fathallah, and M. Alouini, "Experimental demonstration of outdoor 2.2 Tbps super-channel FSO transmission system," *2016 IEEE ICC*, 2016.
- [10] IEEE, "*Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*," pp. 1-3534, 2016.
- [11] R. A. Shafik, M. S. Rahman, and A. R. Islam, "On the extended relationships among EVM, BER and SNR as performance metrics," in *Proc. Int. Conf. Elect. Comput. Eng.*, 2006.
- [12] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, "*Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*," CRC Press, 2nd Ed., 2018.
- [13] A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books, 1986.

**김 종 민 (Jong-Min Kim)**



2020년 2월 : 고려대학교 전기  
전자공학부 학사  
2020년 3월~현재 : 고려대학교  
전기전자공학과 석박사통합  
과정  
<관심분야> 통신공학, 위성통  
신, 무선광통신

[ORCID:0000-0001-8990-3027]

**이 주 형 (Ju-Hyung Lee)**



2016년 2월 : 고려대학교 전기  
전자전파공학부 학사  
2021년 8월 : 고려대학교 전기  
전자공학과 박사  
2021년 9월~현재 : 고려대학교  
정보통신기술연구소 연구교  
수

<관심분야> 비-지상망 네트워크, 무선광통신, 기계  
학습

[ORCID:0000-0003-1947-0283]

**고 영 채 (Young-Chai Ko)**



1997년 2월 : 한양대학교 전자  
통신 학사  
1999년 5월 : University of  
Minnesota, 전기공학 석사  
2001년 10월 : University of  
Minnesota, 전기공학 박사  
2001년 3월~2004년 2월 :

Texas Instruments InC., San Diego, CA USA.  
2004년 2월~현재 : 고려대학교 전기전자공학부 교수  
<관심분야> 통신공학, 무선통신  
[ORCID:0000-0003-1043-9028]