

Micro LED-to-LED 무선 가시광 통신의 실험적 증명

권동윤* · 김성만**

Experimental Demonstration of Micro LED-to-LED Visible Light Communications

Dong-Yoon Kwon* · Sung-Man Kim**

요약

LED-to-LED VLC(Visible Light Communications) 기술은 기존의 VLC 기술과 달리 송신부와 수신부를 모두 LED로 사용한 기술이다. 본 논문에서는 Micro LED를 송신부로 사용한 Micro LED-to-LED VLC 기술을 연구하였다. Red, Yellow, Green, Blue, White 색상의 송/수신부 LED에 따라 통신 시스템의 상승 시간과 신호 대 잡음비를 측정하여 채널 용량을 비교하였다. 본 실험 결과에 따르면, 송신부 Micro LED가 Blue이고 수신부 LED가 Green일 때에 통신 시스템 중에서 가장 좋은 결과인 125 kbps의 채널 용량을 갖는 것을 확인하였다. 또한, OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 신호를 사용하여 비트 에러율을 확인한 결과, 250 kbps까지는 통신이 가능함을 실험적으로 확인하였다.

ABSTRACT

LED-to-LED VLC is a technology that uses LEDs as both a transmitter and a receiver unlike the typical VLCs. In this paper, we experimentally demonstrate a micro LED-to-LED VLC using Micro LED. We tested all the possible VLC cases using red, yellow, green, blue, and white color LED as both a transmitter and a receiver, and measured rise time and SNR. Then we calculated channel capacity depending on the LED color sets. Our experimental results show that the best channel capacity is 125 kbps when the transmitter micro LED was blue and the receiver LED was green. We also measured BERs of VLCs using OFDM signal, and we showed a successful micro LED-to-LED VLC upto 250 kbps.

키워드

LED-to-LED Visible Light Communication, Micro LED, Optical Wireless Communication
LED-to-LED 가시광 통신, Micro LED, 무선 광통신

1. 서론

LED(Light Emitting Diode)는 백열등, 형광등과 같은 기존 조명들에 비해서 높은 전력 효율, 긴 수명, 빠른 응답 시간이라는 장점 덕분에 기존의 조명들을

대체하고 있다. 특히, 빠른 응답 시간이라는 특징 때문에 LED는 통신 시스템의 송신기로 사용할 수 있다. 이 점을 이용해서 LED를 조명용으로 사용하는 동시에 송신기로서 정보를 보내는 기술인 VLC(Visible Light Communication)에 대한 연구가 활발히

* 경성대학교 전자공학과 (kwondy0131@gmail.com)

** 교신저자 : 경성대학교 전자공학과 (sungman@ks.ac.kr)

• 접수일 : 2021. 01. 16

• 수정완료일 : 2021. 03. 02

• 게재확정일 : 2021. 04. 17

• Received : Jan. 16, 2021, Revised : Mar. 02, 2021, Accepted : Apr. 17, 2021

** Corresponding Author : Sung-Man Kim

Dept. Electronic Engineering, KyungSung University,

Email : sungman@ks.ac.kr

이루어지고 있다.

하지만, VLC 기술은 아직 상용화가 잘 이루어지지 않고 있다. 그런 점에서, 우리는 VLC 기술의 상용화 문제를 해결하기 위해 기존의 VLC 기술과는 달리 송신부와 수신부 모두 LED를 사용하는 LED-to-LED VLC를 제안한 바 있다 [1]. 또한, LED-to-LED VLC 기술이 전이중 통신도 가능성을 실험적으로 증명하였다 [2]

한편, Micro LED가 차세대 LED 소자로 주목받으며, Micro LED에 대한 개발 및 연구가 최근 활발히 진행 중이다. Micro LED는 기존 LED보다 빠른 응답 속도, 높은 광 효율 등의 장점이 있어 LED-to-LED VLC에 적용한다면 더 좋은 성능을 낼 것이라 기대된다.

따라서 본 논문에서는 Micro LED를 송신부로 사용한 Micro LED-to-LED VLC를 제안하고자 한다. Micro LED-to-LED VLC의 실험적 증명을 위해 Red, Yellow, Green, Blue, White 색상의 LED들을 사용하였고, 각 채널의 상승 시간과 신호 대 잡음비를 측정하여 채널 용량을 비교하였다. 또한, 실제 통신 시스템으로 활용될 수 있을지 판단하기 위해서 가장 높은 채널 용량을 가진 채널에 OFDM 신호를 송신하는 실험을 진행하였다. 마지막으로, 데이터 율에 따른 비트 에러율을 측정하여 Micro LED-to-LED VLC의 성능을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 기존의 VLC 기술과 LED-to-LED VLC 기술의 차이를 설명하고, III장에서는 제안하고자 하는 Micro LED-to-LED VLC를 실험적으로 증명하고자 한다. 또한, 실험 결과로 도출된 결론을 IV장에서 다루고자 한다.

II. 무선 가시광 통신

2.1 기존의 VLC

VLC 기술은 380~740 nm의 가시광 대역을 이용한 통신기술이고 [3], 송신부는 LED나 레이저 다이오드와 같은 광소자로 송신하며 PD(photo diode), 이미지 센서 등의 광센서로 수신하는 것이 VLC의 기본 구성이다. 기존 VLC의 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었다.

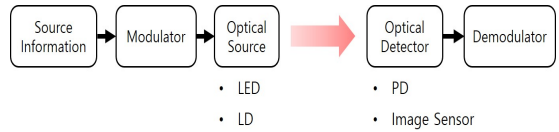


그림 1. 기존 VLC의 블록 다이어그램
Fig. 1 Block Diagram of typical VLC system

또한, VLC는 RF(Radio Frequency) 무선 통신에 비해 여러 장점들이 있다. VLC는 약 400 THz의 넓은 대역폭을 가지고 있으며, 다른 전자기기들에 전자파와 장애를 일으키지 않는다 [4]. 그리고 이미 건물에 조명용으로 설치되어 있는 LED에 마이크로 컨트롤러를 추가해서 쉽고 간단하게 구현이 가능한 장점이 있다. 또한, 각 LED 모두 AP(Access Point)로 동작할 수 있기 때문에 VLC는 사물인터넷이나 대규모 사물 통신과 같이 높은 연결성을 요구하는 기술들에 적용하기 적합한 통신 기술이다. 그리고 VLC는 10 Gb/s 이상의 고속 통신 링크 구현이 가능한 장점을 가지고 있다 [5].

이러한 장점들 덕분에 공간 다중화 기법을 이용한 VLC 기법 [6], SDR(Software-Defined Radio)[7], 광-주파수 변환 [8], 실내 위치 측정 [9]을 이용한 VLC 기법들이 연구된 바 있다. 또한, 신호등과 차량간의 VLC [10], 전이중 차량용 VLC 시스템 [11] 등에도 활용되고 있다. 또한, VLC 기술은 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템 [12], 사용자 인식 시스템 [13]에 적용된 바 있다.

하지만, VLC 기술은 뛰어난 장점들을 갖고 있음에도 불구하고 아직 상용화가 잘 이루어지지 않고 있다. VLC 기술은 수신부로 PD(Photo Diode), 이미지 센서 등의 광센서를 사용하기 때문에 구현을 위해서 추가로 광센서를 설치해야 하는 불편함이 있다. 따라서, 우리는 VLC의 이런 불편함을 해결하지 못한 점을 상용화가 성공하지 못한 이유 중의 하나라고 생각한다.

2.2 LED-to-LED VLC

LED-to-LED VLC는 기존의 VLC와는 달리 송신부와 수신부 모두 LED를 사용하는 통신 기술이다. LED-to-LED VLC의 블록 다이어그램을 그림 2에 나타내었다. 여기서 LED가 VLC의 수신부로 사용될 수 있는 이유는 LED와 PD가 모두 PN 접합으로, 물리적

인 구조는 서로 같기 때문이다. LED는 밴드갭 에너지보다 작거나 같은 에너지의 광자를 발광하기 위해 설계된 다이오드인 반면에, PD는 밴드갭 에너지보다 크거나 같은 에너지의 광자를 받아들여 전류를 생산하는 다이오드이다. 하지만, LED와 PD의 물리적 구조는 같기 때문에 LED에 역방향 바이어스를 걸어주면 LED도 PD처럼 동작이 가능하다. 우리는 이미 반이중 LED-to-LED VLC 연구를 통해 LED가 VLC의 수신부로 사용이 가능함을 증명한 바 있다 [1]. 또한, 전이중 LED-to-LED VLC도 가능함을 실험적으로 증명하였다 [2].

따라서 LED-to-LED VLC는 PD, 이미지 센서 등의 광소자를 추가로 설치할 필요가 없기 때문에 기존 VLC보다 쉽고 편리하게 구현할 수 있다. 또한, LED는 이미 신호등, 스마트폰, 텔레비전 디스플레이, 자동차, 조명 등에 수많은 기기들에 내장되어 있으므로 LED가 내장된 기기들 간의 사물인터넷이나 대규모 사물통신, 차량-사물 통신 등에도 활용이 가능할 것으로 보인다.

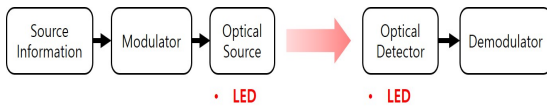


그림 2. LED-to-LED VLC의 블록 다이어그램
Fig. 2 Block Diagram of LED-to-LED VLC system

한편, Micro LED는 10~100 μm 정도로 크기가 매우 작고, 기존 LED보다 빠른 응답 속도, 높은 광효율, 높은 휘도, 낮은 전력과 수명이 길다는 장점이 있다. 이러한 장점들 때문에 Micro LED를 VLC에 적용한 연구가 이미 진행되었다[14-15]. 하지만, Micro LED를 LED-to-LED VLC에 적용한 연구는 부족하기 때문에 본 논문에서는 Micro LED를 송신부로 사용하는 Micro LED-to-LED VLC를 제안하고자 한다.

III. Micro LED-to-LED 무선 가시광 통신

3.1 송/수신부의 세부적 특성

본 연구에서는 Micro LED-to-LED VLC의 가장 적합한 색상 조합을 찾기 위해서 송신부 Micro LED와 수신부 LED를 Red, Yellow, Green, Blue, White

색상을 사용한 모든 경우를 측정하였다. 송신부 Micro LED는 2.0 x 1.5 mm 크기의 Bowerful 사의 Micro LED를 사용하였고, 수신부 LED는 5 mm의 지름을 가지는 YINHUI PHOTOELECTRIC 사의 NBL-R5 LED를 사용하였다. 그리고 송/수신부의 세부적인 특성을 얻기 위해 각 LED들의 파장과 광파워를 측정하였다. 측정된 결과는 각각 그림 3, 그림 4, 그림 5, 그림 6에 나타내었다. Red, Yellow, Green, Blue, White 색상의 Micro LED의 파장은 각각 671, 606, 518, 465, 453 nm이며, Red, Yellow, Green, Blue, White 색상의 LED의 파장은 각각 629, 591, 526, 465, 455 nm로 측정되었다.

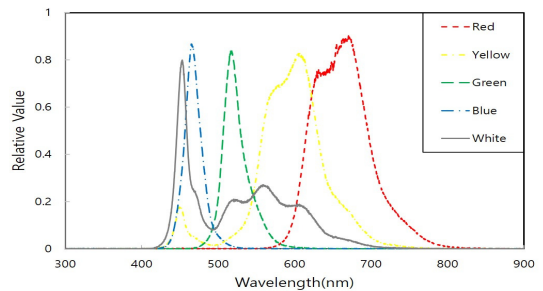


그림 3. 송신부 Micro LED의 파장 측정
Fig. 3 Wavelength of Transmitter Micro LED

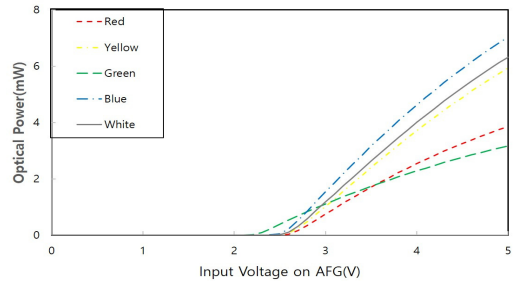


그림 4. 송신부 Micro LED의 광파워 측정
Fig. 4 Optical Power of Transmitter Micro LED

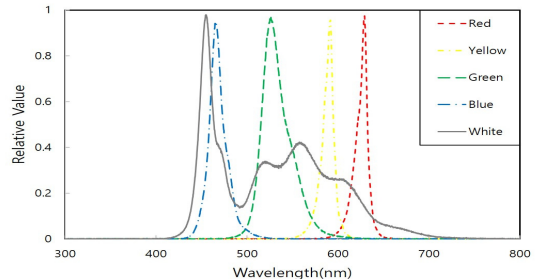


그림 5. 수신부 LED의 파장 측정
Fig. 5 Wavelength of Receiver LED

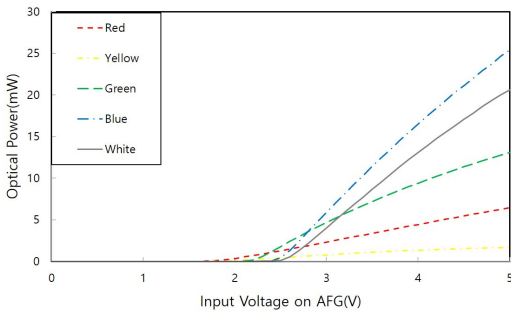


그림 6. 수신부 LED의 광파워 측정
Fig. 6 Optical Power of Receiver LED

또한, 송신부의 신호가 수신부에서 선형적으로 수신되기 위해서 송신부와 수신부 간의 선형성을 확인하기 위한 실험도 진행하였다. 송신부 Micro LED에 0~5V까지 입력 전압을 변화시켰을 때, 수신부의 출력 전압을 측정하였고, 모든 경우에서 입력 전압이 3~4V 사이일 때, 선형성을 나타내는 것을 확인하였다. 따라서, 이 선형성을 바탕으로 신호의 진폭을 3~4V로 조정하여 Micro LED-to-LED VLC 실험을 진행하였다.

3.2 채널 용량 측정

Micro LED-to-LED VLC 실험을 하기에 앞서, 송신부와 수신부의 모든 색상 조합 중에서 가장 적합한 색상 조합을 찾는 방법으로 채널 용량을 비교하였다. 채널 용량을 구하기 위해서 모든 색상 조합으로 사각파 신호를 송신했을 때 수신부의 상승 시간과 신호 대 잡음비를 측정하였다. 측정된 상승 시간과 신호 대 잡음비는 새너의 채널 용량 공식(1)에 대입하여 모든 색상 조합의 채널 용량을 구하였다. 또한, 상승 시간과 신호 대 잡음비를 측정하기 위한 실험 구성도는 그림 7에 나타내었다.

$$C \approx \frac{0.35}{t_{risetime}} * \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

그리고 모든 색상 조합의 계산된 채널 용량 결과를 표 1에 나타내었다. LED의 파장 간의 밴드갭 에너지 때문에 수신부 파장이 송신부 파장보다 짧은 경우에는 통신이 되지 않기 때문에 통신이 되지 않는 색상

의 조합은 -로 표시하였다. 계산한 결과, 송신부 Micro LED가 Blue, 수신부 LED가 Green 색상일 경우(Blue-to-Green), 채널 용량이 124.6 kbps로 가장 좋은 결과를 나타냈다. 따라서, Micro LED-to-LED VLC에서 가장 적합한 색상 조합은 Blue-to-Green 조합인 것으로 확인하였다.

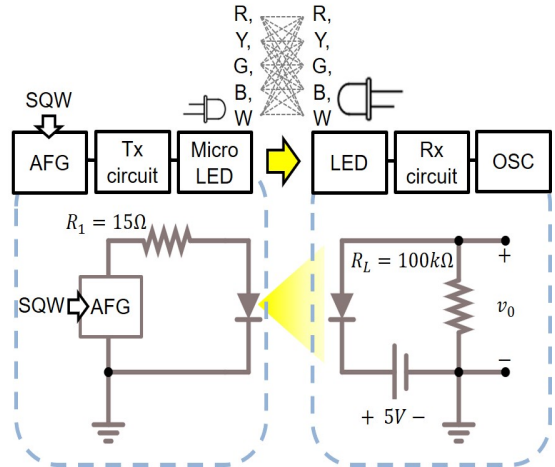


그림 7. 상승 시간과 신호 대 잡음비를 측정하기 위한 실험 구성도

Fig. 7 Experimental setup for measuring rise time and SNR

표 1. 각 색상 조합의 채널 용량
Table 1. Channel capacity of color set

Channel Capacity (kbps)	Tx	Rx				
		R	Y	G	B	W
Tx	R	2.4	-	-	-	-
	Y	123.6	115	-	-	-
	G	71.4	124.1	3.9	-	-
	B	19.6	15	124.6	55.4	-
	W	39.2	103	93.1	51.4	2.3

3.3 OFDM 신호 통신 실험

Micro LED-to-LED VLC가 실제 통신 모델에 활용될 수 있을지 확인하기 위해서 Blue-to-Green 조합

에 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 신호 통신 실험을 진행하였다. 그림 8은 OFDM 신호 통신 실험의 블록 다이어그램이며, 그림 9는 실제 실험한 OFDM 신호 통신 실험의 사진이다.

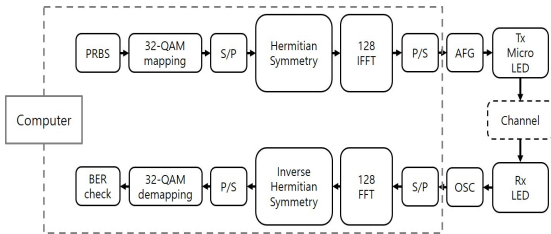


그림 8. OFDM 통신 실험의 블록 다이어그램
Fig. 8 Block diagram of OFDM communication experiment

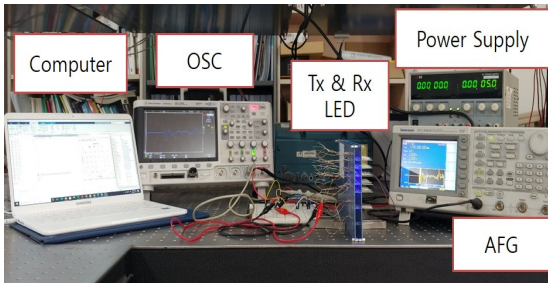


그림 9. OFDM 통신 실험 사진
Fig. 9 Picture of OFDM communication experiment

실험 과정은 우선 PRBS (pseudo random binary sequence) 신호를 32-QAM (quadrature amplitude modulation) 변조한 후에 Hermitian Symmetry로 배열하고 IFFT(: Inverse Fast Fourier Transform) 처리를 통해 OFDM 신호를 생성하였다. 이렇게 생성된 OFDM 신호를 Blue 색상의 Micro LED로 송신하고, Green 색상의 LED로 그 신호를 수신하였다. 그 이후 과정은 송신부 과정과 반대로 진행하게 되며, 마지막으로 매트랩(Matlab)을 이용해 비트 에러율을 계산하였다. 그리고 데이터 율에 따른 비트 에러율 결과를 그린 그래프를 그림 10에 나타내었다. 실험 결과, 데이터율이 25~125 kbps일 때, 10^{-5} 미만의 비트 에러율이 검출되었고, 250 kbps일 경우의 비트 에러율 결과는 4.4×10^{-4} 로 준수한 결과를 나타내었다. 따라서, Micro LED-to-LED VLC로 OFDM 신호를 송신했을 때, 250 kbps까지는 통신이 가능함을 확인하였다.

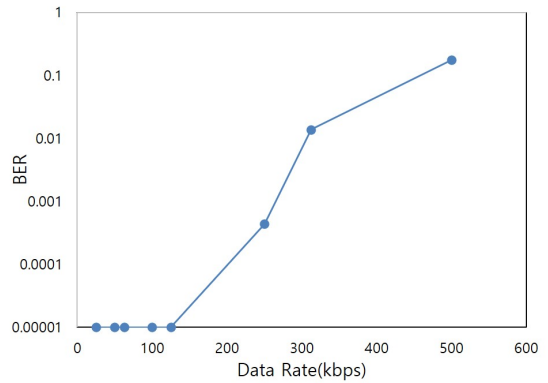


그림 10. 데이터 율에 따른 비트 에러율 결과
Fig. 10 BER Results as a function of data rate

IV. 결론

본 논문에서는 Micro LED를 송신부로서 사용하는 Micro LED-to-LED VLC에 대한 실험을 수행하였다. 송신부와 수신부로 Red, Yellow, Green, Blue, White 색상의 Micro LED와 LED를 사용하였고, 송신부와 수신부의 모든 색상 조합에서 가장 적합한 색상 조합을 찾기 위해 사각파를 이용해 상승 시간과 신호 대 잡음비를 측정하였으며, 이를 새년의 채널 용량 공식 (1)에 대입하여 모든 색상 조합의 채널 용량을 비교하였다. 비교한 결과, 송신부 Micro LED가 Blue, 수신부 LED가 Green일 때, 125 kbps로 가장 좋은 결과를 나타내었다. 또한, Blue-to-Green 조합일 때 실제 통신 모델에 활용될 수 있을지 판단하기 위해 OFDM 신호 통신 실험을 진행하였고, 데이터 율에 따른 비트 에러율 결과를 확인한 결과, 250 kbps까지는 통신이 가능함을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 Micro LED-to-LED VLC의 데이터 율이 250kbps로 다소 낮은 결과를 보인다. 데이터 율 결과를 높일 방법으로 추후 연구에서 OFDM 통신 실험 과정에서 등화(Equalization) 기법을 추가할 필요가 있다. 또한, 시중에 판매하는 저렴한 Micro LED를 사용했기 때문에 Micro LED를 수신부로 사용했을 때 성능이 매우 좋지 않았다. 따라서 본 논문에서는 Micro LED를 송신부로부터만 사용했기 때문에 고가의 Micro LED를 사용한다면 Micro LED-to-LED VLC도 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1F1A1045956).

References

- [1] S. Kim and H. Lee, "Half-duplex visible light communication using an LED as both a transmitter and a receiver," *Int. J. of Communication Systems*, vol. 29, no. 12, 2016, pp. 1889-1895.
- [2] H. Jung and S. Kim, "A Full-Duplex LED-to-LED Visible Light Communication System," *Electronics*, vol. 9, no. 10, 2020, pp. 1713.
- [3] H. Hass, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, "What is LiFi?," *J. of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 6, 2016, pp. 1533-1544.
- [4] S. Kim and S. Kim, "Wireless visible light communication technology using optical beamforming," *Optical Engineering*, vol. 52, no. 10, 2013, paper 106101.
- [5] R. Bian, I. Tavakkolnia, and H. Hass, "15.73Gb/s Visible Light Communication with Off-the-Shelf LEDs," *J. of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 10, 2019, pp. 2418-2424.
- [6] S. Kim and H. Lee, "Visible light communication based on space-division multiple access optical beamforming," *Chinese Optics Letters*, vol. 12, no. 12, 2014, pp. 120601-120601.
- [7] R. Martinek, L. Danyts, and R. Jaros, "Visible Light Communication System Based on Software Defined Radio: Performance Study of Intelligent Transportation and Indoor Applications," *Electronics*, vol. 8, no. 4, 2019, pp. 433.
- [8] R. A. M. Ciro, F. E. L. Giraldo, A. F. B. Perez, and M. L. Rivera, "Characterization of Light-To-Frequency Converter for Visible Light Communication Systems," *Electronics*, vol. 7, no. 9, 2018, pp. 165.
- [9] H. Q. Tran and C. Ha, "Fingerprint-Based Indoor Positioning System Using Visible Light Communication – A Novel Method for Multipath Reflections," *Electronics*, vol. 8, no. 1, 2019, pp. 63.
- [10] K. Cui, G. Chen, Z. Xu, and R. D. Roberts, "Traffic light to vehicle visible light communication channel characterization," *Applied Optics*, vol. 51, no. 27, 2012, pp. 6594-6605.
- [11] B. M. Masini, A. Bazzi, and A. Zanella, "Vehicular visible light networks with full duplex communications," *2017 5th IEEE Int. Conf. on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, Naples, Italy, 2017, pp. 98-103.
- [12] J. Kim and S. Hong, "An Efficient Candidate Activation Pattern Set Generation Scheme for GSM in Optical Wireless Communication with High Interference Environment," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 14, no. 5, 2019, pp. 863-870.
- [13] J. Kim and W. Lee, "An User-aware system using Visible Light Communication," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 14, no. 4, 2019, pp. 715-722.
- [14] R. X. G. Ferreira, E. Xie, J. J. D. McKendry, S. Rajbhandari, H. Chun, G. Faulkner, S. Watson, A. E. Kelly, E. Gu, R. V. Penty, I. H. White, D. C. O'Brien, and M. D. Dawson, "High Bandwidth GaN-Based Micro-LEDs for Multi-Gb/s Visible Light Communications," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 19, Oct. 2016, pp. 2023-2026.
- [15] M. S. Islam, R. X. Ferreira, X. He, E. Xie, S. Videv, S. Viola, S. Watson, N. Bamiedakis, R. V. Penty, I. H. White, A. E. Kelly, E. Gu, H. Hass, and M. D. Dawson, "Towards 10Gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based

visible light communication using a GaN violet micro-LED," *Photonics Research*, vol. 5, no. 2, Apr. 2017, pp. A35-A43.

저자 소개

권동윤(Dong-Yoon Kwon)



2017년~2021년 경성대학교 전자공학과 광통신 연구실
2021년 경성대학교 전자공학과 공학사
2021년~현재 DGIST 정보통신융합전공

※ 관심분야 : 광통신, 무선 광통신, 광 전력전송

김성만(Sung-Man Kim)



1999년 KAIST 전기및전자공학과 공학사
2001년 KAIST 전기및전자공학과 공학석사
2006년 KAIST 전기및전자공학과 공학박사

2006년~2009년 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원
2009년현재 경성대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 광통신, 무선 광통신, 광 전력전송

