

# LED-to-LED 가시광 통신을 이용한 V2V 통신 실험

신 주 환\*, 최 지 훈\*, 김 성 만<sup>o</sup>

## V2V Communication Based on LED-to-LED Visible Light Communication

Ju-hwan Shin\*, Ji-hoon Choi\*, Sung-Man Kim<sup>o</sup>

요 약

LED-to-LED 가시광 통신기술은 LED 조명을 송신기로도 사용하고 수신기로도 사용하는 독특한 통신기술이다. 본 논문에서는 차량용 LED 전조등을 송신기로 사용하고 차량용 LED 후미등을 수신기로 사용하여 차량간 통신을 LED-to-LED 가시광 통신을 통해 구현하였다. 본 연구에서는 실제 실험을 통해 본 통신 시스템의 SNR, 채널용량, BER 등을 측정하여 성능을 평가하였고, 11.7 kbps까지의 통신이 가능함을 실험적으로 확인하였다. 본 기술은 향후 자율 주행의 핵심 기술인 V2V 통신기술에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

**키워드** : LED-to-LED, 가시광통신, 무선 광통신, 차량간 통신

**Key Words** : LED-to-LED, Visible Light Communication, Optical Wireless Communication, Inter-Vehicle Communication

### ABSTRACT

LED-to-LED visible light communication technology is a unique communication technology that uses LED lighting as both a transmitter and a receiver. In this paper, vehicle LED headlights are used as transmitters and vehicle LED taillights as receivers to implement inter-vehicle communication through LED-to-LED visible light communication. In this study, the performance of this communication system was evaluated by measuring the SNR, channel capacity, BER, etc., through actual experiments, and it was experimentally confirmed that communication up to 11.7 kbps is possible. This technology could be usefully applied to V2V communication technology, a core technology of future autonomous driving.

### 1. 서 론

소비자들의 무선 데이터 사용량이 점점 증가하고 있는 추세에 따라 향상된 데이터 전송 속도(data rate), 신뢰도(reliability), 응답시간(latency), 연결성(connection) 등의 서비스를 제공하기 위한 5G 이동통신 기술이 상

용화 되었다. 이러한 이동 통신 기술의 발전은 더 높은 주파수 대역을 요구하고 있으며, 이미 포화화 상태인 RF(radio frequency)주파수 대역보다 더 높은 대역을 가진 통신 기술이 필요로 할 것으로 예측된다.

통신 시스템에서 채널의 주파수 대역폭 (bandwidth)의 증가는 더 높은 데이터 전송 용량을 확보 할 수 있다

※ 본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2021R111A3047031).

• First Author : Kyungsoo University, Department of Electronic Engineering, wngghks6175@naver.com, 정희원

o Corresponding Author : Kyungsoo University, Department of Electronic Engineering, sungman@ks.ac.kr, 송진희원

\* Kyungsoo University, Department of Electronic Engineering, wlgnsdl1028@naver.com

논문번호 : 202403-056-E-RN, Received March 29, 2024; Revised June 7, 2024; Accepted August 11, 2024

는 것을 의미한다. 과포화 상태의 RF 주파수 대역을 사용하는 대신 보다 더 높은 주파수 대역의 가시광 대역을 사용하여 400 THz의 규제되지 않은 넓은 대역폭을 가진 가시광통신 (visible light communication, VLC) 기술이 통신 시스템의 성능을 향상시키고 이런 문제를 해결할 통신 기술로 손꼽히고 있다. 이 뿐만 아니라, 가시광 통신기술은 쉬운 구현성, 높은 연결성, 무 전자파 장애, 높은 보안성, 높은 채널 용량 이라는 장점을 가지고 있어 가시광 통신기술에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있다<sup>1)</sup>.

한편, 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 보낼 수 있다. 또한 LED는 PD (photodiode)와 물리적 구조가 PN접합으로 동일하다는 점으로 수신기로서도 사용이 가능하다. 수신기로 사용하였을 때 뛰어나게 구축된 LED 인프라를 통해 추가적인 수신기 설치를 요구하지 않는다는 경제적인 장점이 있다. 이를 통해 VLC 기술 중 하나인 LED-to-LED VLC기술은 송/수신단에 LED만을 사용하여 통신이 가능함이 실험적으로 증명되었다<sup>2)</sup>.

LED를 사용한 전조등과 후미등을 사용하여 LED-to-LED VLC에 적용한다면 V2V(Vehicle to Vehicle)통신에 더 좋은 통신 성능을 낼 것이라 기대된다. 자율 주행의 핵심 기술인 V2V는 차량과 차량이 통신하면서 교통상황 등의 정보를 교환하거나 공유하는 기술을 말한다. 이러한 LED-to-LED VLC 기술을 활용한 V2V 통신기술에 대해서는 아직 연구된 바가 없는 것으로 조사되었고, 이에 본 논문에서는 최초로 LED-to-LED VLC기술을 적용하여 V2V를 구현하고자 하였으며, LED를 사용한 차량용 조명용 전조등과 후미등을 사용하여 정보 전달 시스템을 구현하여 실험적으로 증명하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 무선 가시광 통신에 대해 설명하고, III장 LED-to-LED VLC를 이용한 V2V통신을 실험적으로 증명하고자 한다. 또한, 실험 결과로 도출된 결론을 IV장에서 다루고자 한다.

## II. 무선 가시광 통신

### 2.1 무선 광통신

5G 이동통신 기술은 고속의 통신망을 구축하기 위해, 이미 과포화 상태의 RF 주파수 대역을 사용하는 대신 보다 더 높은 주파수 대역의 mm-wave (millimeter-wave) 대역의 반송파 (carrier)를 이용하여, 통신 시스템의 성능을 향상시켰다. RF 주파수 대역의 과포화 및 더 넓은 대역 확보를 위해 mm-wave 대역을 사용하는 5G 이동 통신 기술 출현과 같은 맥락으로 미래에는 mm-wave 대역 또한 포화 될 것을 쉽게 예상할 수 있다. 이에 따라 과포화 된 mm-wave 대역을 대신할 더 넓은 대역 자원을 가진 무선 광통신 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

무선 광통신(OWC) 기술은 IR(infra-red), VL(visible light), UV(ultra-violet) 광 대역, nm-wave (nanometer-wave)의 반송파를 이용하여 무선통신 시스템을 구현하는 미래 지향적 통신 기술이다.

OWC 기술은 규제되지 않은 광대한 대역폭을 갖는 등의 무궁무진한 잠재력으로 인하여 차세대 무선통신 기술로 각광을 받고 있다. OWC 기술은 통신 시스템의 송/수신단 소자의 종류, 통신이 적용될 환경(실내/실외/전송 거리), 그리고 네트워크 구조 등에 따라서, VLC (Visible Light Communication), LiFi (Light Fidelity), OCC (Optical Camera Communication), FSOC (Free Space Optical Communication) 네 가지 기술로 분류할 수 있다.

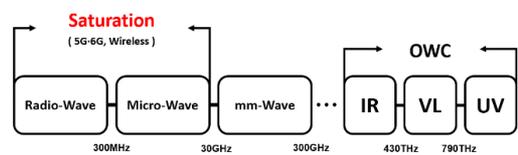


그림 1. 주파수 스펙트럼 대역  
Fig. 1. Frequency spectrum bands

### 2.2 기존의 VLC

VLC 기술은 상향 링크(up link: UL)와 하향 링크(down link: DL) 모두 VL 대역을 이용하여 통신 링크를 형성하는 OWC 기술이다. 송신부는 LED나 LD(Lasor Diode)와 같은 광소자로 송신하며 PD(Photo Diode), 이미지 센서 등의 광센서로 수신하는 것이 VLC의 기본 구성이다. 기존 VLC의 블록 다이어그램을 그림 2에 나타내었다.

VLC는 광범위한 대역폭, 낮은 전력 소비, 전자파 간

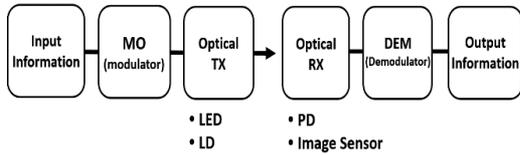


그림 2. 기존 VLC의 블록 다이어그램  
Fig. 2. Block Diagram of typical VLC system

섭(EMI)이 일어나지 않음, 우수한 보안성 등 기존 RF 통신에 비해 여러가지 장점을 가지고 있다. 그리고 이미 건물에 조명용으로 설치되어 있는 LED에 마이크로 컨트롤러를 추가함으로써 쉽고 간단하게 구현할 수 있는 장점이 있다. 또한, 각 LED 모두 AP(Access Point)로 동작할 수 있기 때문에 VLC는 사물인터넷이나 대규모 사물통신과 같이 높은 연결성을 요구하는 기술들에 적용하기 적합한 통신 기술이다. 게다가 VLC는 10 Gb/s 이상의 고속 통신 링크 구현이 가능한 장점도 가지고 있다<sup>3)</sup>.

이러한 장점들 덕분에 공간 다중화 기법을 이용한 VLC 기법<sup>4)</sup>, SDR(Software-Defined Radio)<sup>5)</sup>, 광-주파수 변환<sup>6)</sup>, 실내 위치 측정<sup>7)</sup>을 이용한 다양한 VLC 기법들이 연구되었다. 또한 VLC 기술은 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 시스템<sup>8)</sup>, 사용자 인식 시스템<sup>9)</sup>에 적용된 바 있다.

### 2.3 LED-to-LED VLC

LED-to-LED VLC는 기존의 VLC와는 달리 송신부와 수신부 모두 LED를 사용하는 통신 기술이다. LED는 형광등과 백열등에 비해 전력 효율이 높고 수명이 길고 응답시간이 빠르다는 장점이 있어 기존 조명을 대체하고 있다. LED가 VLC의 수신부로 사용될 수 있는 이유는 LED와 PD가 물리적으로 PN접합 다이오드라는 동일한 구조를 가지고 있기 때문이다. LED는 밴드갭 에너지보다 작거나 같은 에너지의 광자를 발광하는 다이오드인 반면, PD는 밴드갭 에너지보다 크거나 같은 에너지의 광자를 받아들여 전류를 생산하는 수광소자이다. 이러한 구조적 유사성으로 인해, LED에 역방향 바이어스나 제로 바이어스를 걸어주면 LED도 PD처럼 광을 감지하는 수광소자로 이용할 수 있다.

LED는 이미 신호등, 스마트폰, 자동차, 조명, 컴퓨터 등에 수많은 기기들에 탑재되어 사용되고 있어 뛰어난 인프라를 구축하고 있다. 그래서 수신기를 따로 추가할 필요가 없다는 측면에서 매우 큰 경제적인 이익을 갖는다. 또한, LED가 내장된 각종 전자기기들 간의 IoT(Internet of Things)이나 대규모 사물통신, V2V 통

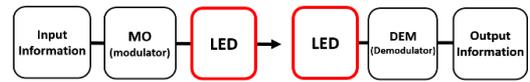


그림 3. LED-to-LED VLC의 블록 다이어그램  
Fig. 3. Block Diagram of LED-to-LED VLC system

신 등에도 활용이 가능할 것으로 보인다.

최근에는 LED를 송신기뿐만 아니라 수신기로 사용하는 LED-to-LED VLC기술이 활발히 연구되고있다.<sup>[10,11]</sup> 마이크로 컨트롤러를 사용하는 전이중 LED-to-LED VLC 및 반이중 LED-to-LED VLC가 가능하다는 것이 실험적으로 증명 되었다<sup>[12,13]</sup>. 이러한 LED-to-LED VLC의 블록 다이어그램을 그림 3에 나타내었다.

### III. LED-to-LED VLC를 이용한 V2V 통신

V2V는 차량과 차량 간에 무선으로 정보를 주고받는 기술을 말한다. V2V는 이동 중이거나 정차 중인 차량 간의 신호 또는 데이터를 송수신하는 무선통신 기술로, 일정 범위 내에 있는 자동차들이 무선 통신을 통해 각자의 위치/속도 정보와 주변 교통상황 정보 등을 주고받으며 갑작스런 교통사고를 예방하는 시스템이다. 또한 주행 중 운전자가 볼 수 없는 사각 지역에 다른 차량을 인지하거나, 해당 차량으로 인한 사고를 미연에 방지할 수 있다. 즉 도로를 달리는 차량들이 서로 정보(자신의 속도와 위치 등)를 주고받으며 충돌 위험성을 차단하기 위한 통신이다<sup>[14]</sup>.

본 논문에서는 이러한 V2V 통신에 LED-to-LED VLC를 접목시켜 전조등 LED를 송신기로, 후미등 LED를 수신기로 사용하는 LED-to-LED VLC 시스템을 구현하였다.

#### 3.1 송/수신단 회로 설계

자동차의 전조등과 후미등 사이의 LED-to-LED VLC 실험을 하기에 앞서 회로를 설계하였다. 전조등과 후미등의 작동전압이 10V를 초과하는데, 최대 입력전압이 5V인 AFG (arbitrary function generator)만으로는 충분하지 않았다. 이 문제를 해결하기 위해, Bias Tee를 이용해 DC Supply에서 공급된 DC 전압과 AFG에서 인가되는 신호를 합쳐 전조등에 들어갈 수 있도록 설계하였다. 수신부인 후미등에는 연산 증폭기(OP Amp)를 사용해 transimpedance 증폭기를 구현하여 수신되는 신호를 증폭하고 OSC에 측정되도록 설계하였다. 설계한 블록 다이어그램과 회로를 그림 4에 나타내었다.

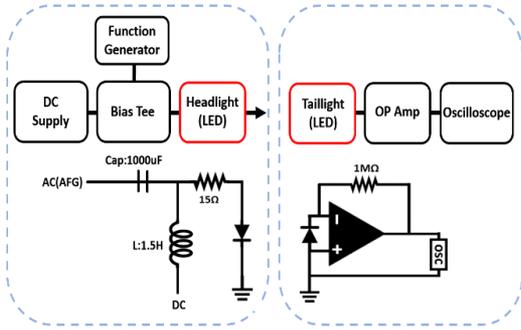


그림 4. 전조등-to-후미등 VLC의 블록 다이어그램 및 회로  
Fig. 4. Block Diagram and circuit of Headlight-to-Taillight VLC system

### 3.2 송/수신부의 세부적 특성

본 연구에서는 차량용 전조등 LED와 후미등 LED를 사용하여 실험을 진행하였다. PHILIPS사의 전조등과 후미등을 사용하였고 송/수신부의 세부적인 특성을 얻기 위해 각 LED의 파장과 전조등의 광파워를 측정하였다. 그리고 선형성이 보이지 않는 구간에서 실험을 하게 되면 수신신호에서 Clipping 현상으로 인해 왜곡이 발생하기 때문에 선형적 특성을 확인하였다. 수신부의 Load 저항에서 송신부 입력전압이 15~17V로 선형적 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 측정된 결과는 각각 그림 5, 그림 6, 그림 7에 나타내었다.

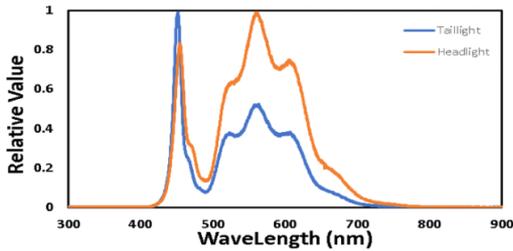


그림 5. 전조등, 후미등의 파장 측정  
Fig. 5. Wavelength of Headlight and Taillight

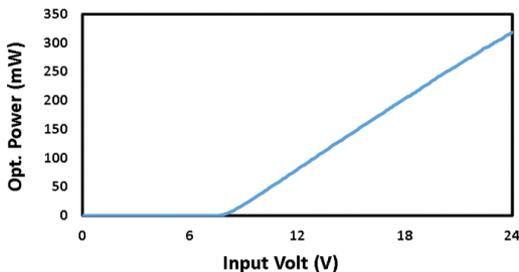


그림 6. 송신부 전조등의 광파워 측정  
Fig. 6. Optical Power of Transmitter Headlight

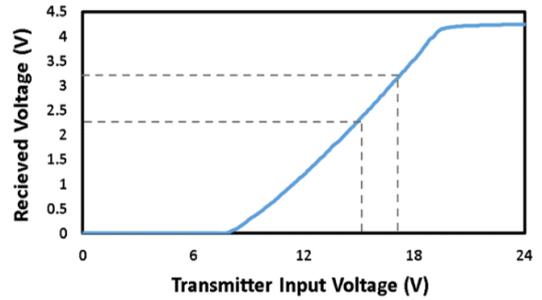


그림 7. 송/수신부의 선형성 측정  
Fig. 7. Linearity of Transceiver

전조등의 peak 파장은 560nm이며 후미등의 peak 파장은 451nm로 측정되었다. 또한 측정된 선형성을 바탕으로 신호의 진폭을 15~17V로 조정하여 LED-to-LED VLC 실험을 진행하였다.

또한, 반대로 송/수신기를 바꾸어서 후미등을 송신기로 사용하고 전조등을 수신기로 사용하는 LED-to-LED VLC 실험을 했지만 이 경우에는 시스템이 동작하지 않았다. 그 이유는 보편적으로 전조등과 후미등은 기존 LED에 형광체를 도포하여 PC LED를 사용한다. 전조등과 후미등의 파장에서 확인할 수 있듯이 후미등에 비해 전조등에 많은 양의 형광체가 도포되어 있는 것을 확인할 수 있었다. LED에 도포된 형광체는 빛을 산란시키고 신호에 잡음을 더한다. 그렇기 때문에 해당 실험에서 사용한 전조등은 형광체가 많이 도포되어 있어 수신부로 사용하기 부적합하다<sup>15)</sup>.

### 3.3 채널 용량 측정

전조등과 후미등 사이의 LED-to-LED VLC 실험을 하기에 앞서, 먼저 채널용량을 추정하기 위한 실험을 진행하였다. AFG를 사용하여 사인파 신호를 생성하고, 이 신호의 주파수를 점진적으로 증가시키면서 3dB 지점을 찾았다. 이어서, 수신된 신호의 잡음 수준을 측정하기 위해 AFG로 사각파 신호를 생성하고 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 측정하였다. 측정된

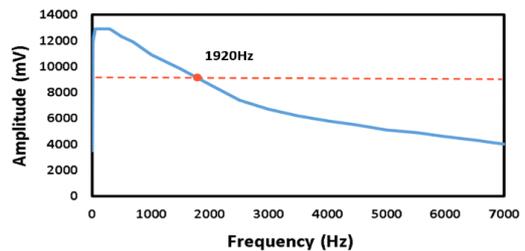


그림 8. 주파수 응답  
Fig. 8. Frequency Response

3dB 대역폭은 1920Hz였으며, SNR은  $4.72 \times 10^4$ 로 측정되었다. 이 데이터를 새년의 채널 용량 공식(1)에 대입한 결과, 계산된 채널 용량은 29.8kbps로 도출되었다. 또한, 주파수 응답과 3dB 지점은 그림 8에 나타내었다.

$$C = f_{3dB} * \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

### 3.4 통신 성능 실험

#### 3.4.1 OFDM 신호 통신 실험

본 LED-to-LED VLC 실험에는 다른 변조기법에 비해 낮은 잡음 정도를 보이는 32-QAM DCO-OFDM (DC-biased optical orthogonal frequency division multiplexing) 변조 기법을 사용하여 실험을 진행하였다. 전조등과 후미등사이의 거리는 2cm로 설정하였다. 그림 9는 OFDM 신호 통신 실험의 블록 다이어그램이며, 그림 10은 실제 실험한 OFDM 신호 통신 실험의 사진이다.

실험 과정은 우선 PRBS(pseudo random binary sequence) 신호를 32-QAM 변조 후 Hermitian Symmetry로 배열하고 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)처리를 통해 OFDM 신호를 생성하였다. 생성된 OFDM 신호를 전조등으로 송신하고, 후미등으로 그 신호를 수신하였다. 수신부의 과정은 송신부 과정과 반대로 진행하게 되며, 마지막으로 매트랩(Matlab)을 이용해 BER을 계산하였다.

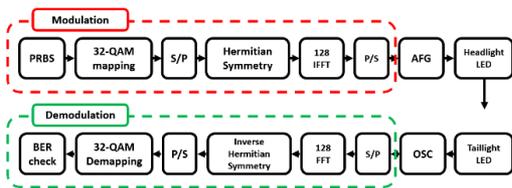


그림 9. OFDM 통신 실험의 블록 다이어그램  
Fig. 9. Block diagram of OFDM communication experiment

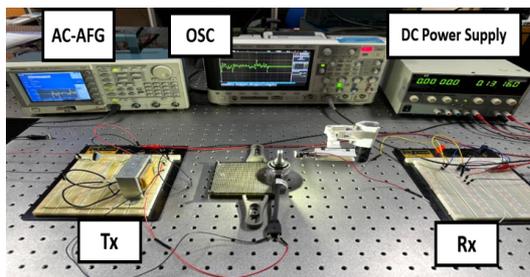


그림 10. OFDM 통신 실험 사진  
Fig. 10. Picture of OFDM communication experiment

#### 3.4.2 BER 측정

Data Rate에 따른 비트 에러율 결과를 그린 그래프를 그림 11에 나타내었다. BER의 문턱값은  $10^{-3}$ 까지 통신이 가능한 범위로 가정하고 실험을 진행하였다. 실험 결과, 전조등-to-후미등 VLC로 OFDM 신호를 송신했을 때, 11.7kbps까지는 통신이 가능함을 확인하였다.

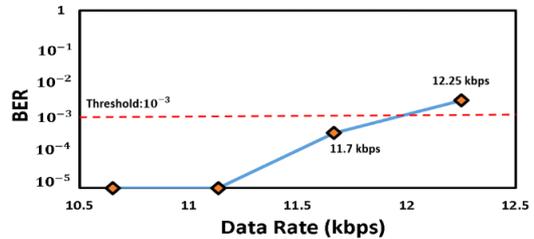


그림 11. Data Rate에 따른 BER 결과  
Fig. 11. BER Results based on Data Rate

## IV. 결론

본 논문에서는 과포화 상태의 RF주파수 대역을 대신할 더 넓은 대역 자원을 가진 무선 광통신(OWC)기술 중 VLC를 사용하였다. 그 중에서 LED-to-LED VLC는 뛰어난 LED 인프라로 경제적인 장점을 가진다. 이에 본 연구에서는 LED-to-LED VLC를 적용하여 자동차의 전조등과 후미등으로 사용되는 LED 조명등을 사용하여 LED-to-LED V2V 통신을 구현하였다.

사인파와 사각파를 이용해 3dB대역폭과 신호 대 잡음비를 측정하였으며, 이를 새년의 채널 용량 공식에 대입하여 채널 용량 29.8 kbps의 결과를 구하였다. 또한 실제 통신 모델에 활용될 수 있을지 판단하기 위해 OFDM 신호 통신 실험을 진행하였고 Data Rate에 따른 BER을 확인한 결과, 11.7 kbps까지는 통신이 가능함을 확인하였다.

본 연구에서는 차량 간 통신을 VLC를 적용하여 구현하는 연구를 수행하고 통신이 원활하게 이루어지는 것을 확인하였다. 향후 차량 통신 범위를 확장하기 위해 렌즈의 사용이나 증폭기를 다수 배치하는 방안을 모색함으로써 VLC 기반 통신의 범위를 넓히고, 그로 인해 차량을 보다 정밀하게 제어할 수 있는 가능성을 연구하고자 한다. 차량 통신 범위를 확장한다면 원거리에서도 차량이 서로 정보를 주고받으며, 이를 기반으로 하는 직접적인 차량 제어가 가능해질 것이다. 이는 비상 상황 시 자동 차량 제어를 통해 사고를 예방하거나 교통 흐름을 개선하는 등 다양하게 응용할 수 있을 것이다. 본 논문이 V2V를 넘어 자율 주행의 핵심 기술인 V2X 연

구에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

## References

- [1] S. Kim and S. Kim, "Wireless visible light communication technology using optical beamforming," *Optical Eng.*, vol. 52, no. 10, p. 106101, 2013.  
(<https://doi.org/10.1117/1.OE.52.10.106101>)
- [2] S. Kim and H. Lee, "Half-duplex visible light communication using an LED as both a transmitter and a receiver," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 29, no. 12, pp. 1889-1895, 2016.  
(<https://doi.org/10.1002/dac.2921>)
- [3] R. Bian I. Tavakkolnia, and H. Hass, "15.73Gb/s visible light communication with off-the-shelf LEDs," *J. Lightwave Technol.*, vol. 37, no. 10, pp. 2418-2424, 2019.  
(<https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2906464>)
- [4] S. Kim and H. Lee, "Visible light on space-division multiple access optical beamforming," *Chin. Optics Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 120601-120601, 2014.  
(<https://doi.org/10.3788/COL201412.120601>)
- [5] R. Martinek, L. Danys, and R. Jaros, "Visible light communication system based on software defined radio: Performance study of intelligent transportation and indoor applications," *Electr.*, vol. 8, no. 4, p. 433, 2019.  
(<https://doi.org/10.3390/electronics8040433>)
- [6] 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," *Electr.*, vol. 7, no. 9, p. 165, 2018.  
(<https://doi.org/10.3390/electronics7090165>)
- [7] H. Q. Tran and C. Ha, "Fingerprint-based indoor positioning system using visible light communication – A novel method for multipath reflections," *Electr.*, vol. 8, no. 1, p. 63, 2019.  
(<https://doi.org/10.3390/electronics8010063>)
- [8] J. Kim and S. Hong, "An efficient candidate activation pattern set generation scheme for GSM in optical wireless communication with high interference environment," *J. Korea Inst. Electr. Commun. Sci.*, vol. 14, no. 5, pp. 863-870, 2019.  
(<https://doi.org/10.13067/JKIECS.2019.14.5.863>)
- [9] J. Kim and W. Lee, "An user-aware system using visible light communication," *J. Korea Inst. Electr. Commun. Sci.*, vol. 14, no. 4, pp. 715-722, 2019.  
(<https://doi.org/10.13067/JKIECS.2019.14.4.715>)
- [10] L. Shangbin, B. Huang, and Z. Xu, "Experimental MIMO VLC systems using tricolor LED transmitters and receivers," in *2017 IEEE GC Wshps.*, vol. 1, 2017.  
(<https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269140>)
- [11] S. Schmid, G. Corbellini, S. Mangold, T. R. Gross, "An LED-to-LED visible light communication system with software-based synchronization," in *2012 IEEE Globecom Wshps.*, vol. 1264, 2012.  
(<https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2012.6477763>)
- [12] S. W. Jo, H. Oh, Y. J. Lee, T. D. Le, and B. An, "LED-to-LED two way visible light communication system," *J. Inst. Electron. Inf. Eng.* vol. 53, no. 1, pp. 79-85, 2016.  
(<https://doi.org/10.5573/ieie.2016.53.1.079>)
- [13] H. Jung and S. Kim, "A full-duplex LED-to-LED visible light communication system," *Electr.* vol. 9, no. 10 p. 1713, 2020.  
(<https://doi.org/10.3390/electronics9101713>)
- [14] I. Takai, "Optical vehicle-to-vehicle communication system using LED transmitter and camera receiver," *IEEE Photonics J.*, vol 6, no. 5, p. 188, 2014.  
(<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2352620>)
- [15] M. Kowalczyk and J. Siuzdak, "Influence of reverse bias on the LEDs properties used as photo-detectors in VLC systems," in *Proc. SPIE 9662, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015*, 966205, Sep. 2015.  
(<https://doi.org/10.1117/12.2197831>)

신 주 환 (Ju-hwan Shin)



2024년 2월 : 경성대학교 전자  
공학과 졸업  
<관심분야> 무선 광통신, 광전  
력 전송, IT 융합

김 성 만 (Sung-Man Kim)



1999년 2월 : KAIST 전기및전  
자공학과 학사  
2001년 2월 : KAIST 전기및전  
자공학과 석사  
2006년 2월 : KAIST 전기및전  
자공학과 박사  
2006년 3월~2009년 2월 : 삼성  
전자 정보통신총괄 책임연구원  
2009년 3월~현재 : 경성대학교 전자공학과 교수  
<관심분야> 이동통신, 가시광통신, 광통신, 광전력  
전송

최 지 훈 (Ji-hoon Choi)



2024년 8월 : 경성대학교 전자  
공학과 졸업  
<관심분야> 무선 광통신, 광전  
력 전송, IT 융합