

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.5.71>

IIBC 2017-5-9

## 실내 멀티홉 VLC환경에서 디밍을 적용한 파워 성능 비교

### Power Performance Comparison using Dimming in the Indoor Multi-hop VLC Environment

김주석\*, 이민정\*\*, 김경석\*\*\*

Joo-Seok Kim\*, Min-Jung Lee\*\* and Kyung-Seok Kim\*\*\*

**요약** 본 논문에서는 멀티 홉 VLC 환경에서 디밍 제어를 이용한 각 변조 방식의 전력 성능을 분석 하였다. 성능을 분석하기 위해서 VLC기반 실내 멀티 홉 시스템을 구성하였으며, OPPM과 VPPM의 두 가지 변조 방식 기법을 적용 하였다. 시뮬레이션은 송신 전력과 수신 전력을 고려하여 각 변조기법의 dimming 제어 및 홉 수에 따라서 수행하였다. 그 결과, 변조에 따른 송신 전력 및 수신 전력에서, dimming이 증가함에 따라, OPPM은 VPPM보다 적은 전력 성능을 갖으며, 수신 전력 대 홉 수 및 dimming이 50 % 일 때, 홉 수가 증가하고 거리가 길수록 VPPM 및 OPPM의 수신 전력은 급속히 감소하는 것으로 나타났다.

**Abstract** Visible light communication (VLC) offers communication function in addition to illumination. Because the signal communication capacity per cable is 1,000 times compared to the power line communication (PLC), optical fiber is being advertised as the basis of the information and communication. Also dimming control of LED is an important component needed to provide energy savings and quality of life. This study configured multi-hop VLC system model in a building using optical fiber and analyzed the power performance of two of modulations using dimming techniques. The transmission power and received power were used to compare the power performance in multi-hop VLC environments.

**Key Words** : Dimming control; Multi-hop; Optical fiber; Visible light communication; Wireless communication.

## 1. 서 론

LED가 일상 생활에서 널리 사용됨에 따라 LED로 통신을 하기 위한 가시광 통신 연구가 진행되고 있다. 가시광 통신은 인간의 눈이 감지 할 수 있는 시간 보다 빠르게 LED를 제어 할 수 있기 때문에 조명 기능 외에 통신 기능을 제공할 수 있다. LED 을 데이터를 송신하는 경우, 디밍(dimming) 제어를 통해서 광 신호를 전송하게 된다.

VLC에 사용되는 백색 LED는 기존 광원보다 약 20 배, 형광등보다 5 배 적은 전력을 소비하기 때문에 저전력으로 구현이 가능하고 환경 친화적인 장점을 갖는다<sup>[1]-[4]</sup>. 이러한 저전력 관점에서 VLC(Visible Light Communication) 기술은 무선 통신에서 상당한 주목을 받고 있다<sup>[5]-[8]</sup>. 그중에서 디밍 제어는 VLC의 중요한 구성 요소이며, 디밍은 사용자가 요구하는 평균 밝기를 맞추는 것이다. 최소 밝기 0와 최대 밝기 A 사이에서 요구

\*정회원, 한국전자통신연구원 사업화부문

\*\*정회원, (주)에버정보기술

\*\*\*정회원, 충북대학교 전자통신공학과 (교신저자)

접수일자: 2017년 9월 20일, 수정완료: 2017년 10월 5일

게재확정일자: 2017년 10월 13일

Received: 20 September, 2017 / Revised: 5 October, 2017 /

Accepted: 13 October, 2017

\*Corresponding Author: kseokkim@cbnu.ac.kr

Dept. of Electrical and Electronic Eng. Chungbuk National University, Korea

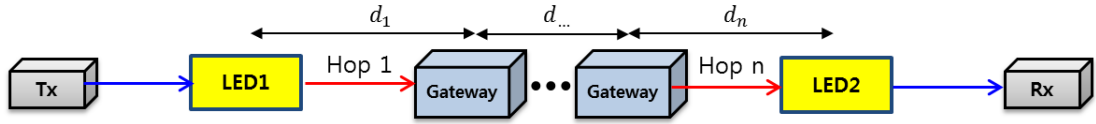


그림 1. VLC 시스템 모델의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of the VLC system model

디밍이  $d$ 라면, 평균적으로  $dA$ 의 밝기를 만족하는 것이다.

LED 조명의 밝기는 듀티 사이클과 관련이 있으며, 이는 펄스가 켜져 있는 시간을 의미한다<sup>[9]-[11]</sup>. 듀티 사이클 제어 가능한 두 개의 변조 방식은 대표적으로 Variable pulse position modulation (VPPM)과 Overlapping pulse position modulation (OPPM)가 있으며, IEEE 802.15.7 VLC 표준<sup>[12]</sup>에 따르면 VPPM은 정전류 LED 드라이버와의 완벽한 호환성을 위해 지원된다. OPPM은 펄스 폭 당 하나 이상의 펄스를 허용하는 변조 방식이다. 이 기법들은 동일한 에너지 신호 및 낮은 듀티 사이클과 같은 몇 가지 유용한 특성이 있어서 높은 채널 용량과 통신 속도를 얻을 수 있다<sup>[13]</sup>.

기본적으로 가시광 통신은 저 전력으로 통신거리가 제한되므로 통신 반경 바깥에 위치한 단말과 통신하기 위해서는 주변 단말과의 협력을 통한 멀티홉 전송이 필요하다. 현재 가정이나 빌딩 등에서 주로 사용되고 있는 방식은 음성과 문자데이터, 영상 등을 전송하는 기술로써 별도의 배전공사 없이 가정에 이미 깔려있는 전력선을 사용해 구현하고 있다. 그러나 전력선 통신의 고유한 데이터 전송 속도의 한계 때문에 전력선 통신을 통한 VLC 네트워크는 Gbit/s 액세스 서비스를 제공할 수 없다<sup>[14]</sup>. 따라서, 초고속 VLC 액세스에 대한 더 나은 방안으로 더 큰 변조 대역폭을 갖는 광섬유의 사용하는 것이다<sup>[15]</sup>. 케이블 1 개당 신호 통신 용량은 전력선 통신에 비해 1,000 배이기 때문이다. 이는 광섬유를 기반으로 한 VLC 네트워크의 비용 절감에 기여할 수 있음을 의미한다.

본 논문에서는 광섬유를 사용하는 건물에서 VLC 기반 멀티홉 시스템 모델을 구성하였으며, 성능 평가를 위해 OPPM과 VPPM의 두 가지 변조 방식 기법을 적용하였다. 시뮬레이션은 송신 전력과 수신 전력을 고려하여 각 변조기법의 디밍 제어 및 홉 수에 따라서 수행하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 VLC 기반 멀티홉 시스템에서 변조 방식에 따른 전력 성능 분석에 대해서 서술한다. 3장에서는 모의실험을 통해 성능을

도출하고 분석하며, 끝으로 4장에서는 결론을 맺는다.

## II. VLC 기반 멀티홉 시스템 환경

### 1. 시스템 모델

다음 그림 1과 같이, 건물에 VLC 기반 멀티홉 시스템 모델을 광섬유를 이용하여 구성 하였다. 송신기 (Tx) / 수신기 (Rx)와 LED 사이에 VLC 통신 환경 (파란 선)이 존재하고 LED와 게이트웨이 사이에 광통신 환경 (붉은 선)이 존재한다고 가정한다. Tx와 Rx와 레이어의 차이가 큰 경우 여러 게이트웨이가 LED1과 LED2에 연결된다. LED와 게이트웨이 사이의 거리는 Hop  $n$ 이며, 이때의 길이는  $d_n$ 이다.

첫번째로, VLC 환경에서, 수신 신호  $y(t)$ 는 다음과 같다.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau + n(t) \quad (1)$$

여기서  $x(t)$ 는 전송 신호이며,  $n(t)$ 는 백색 가우시안 잡음이다.  $h(t)$ 는 채널 임펄스 응답을 나타낸다. 반사를 고려하지 않은 LOS 채널의 직류 (DC) 이득은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{LOS} = \begin{cases} \frac{A_r(m_1+1)}{2\pi d_v^2} \cos^{m_1}(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (2)$$

$A_r$  은 detector area이며,  $m_1$  은 Lambertian radiation pattern의 차수이다. 그리고  $d_v$ 는 LED와 photo diode (PD)사이의 거리를 나타낸다.  $\phi$ 는 방사 각도이며,  $\psi$ 는 입사각도이다. 그리고  $\Psi_c$ 는 PD의 시야각도이다.  $T_s(\psi)$ 는 광필터의 이득 값이며,  $g(\psi)$ 는 집광기의 이득 값이다

[16]-[18]

다음으로, 광통신 환경에서 전송 손실을 나타내는 감쇠가 가장 중요한 매개 변수이다. 전송 전력 손실은 전송 경로의 길이에 의존하며, 총 신호 감쇠는 특정 파장에 대해 정의되며 다음과 같이 정의된다.

$$a[dB] = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad (3)$$

여기서  $P_i$ 는 입력 파워 값이며,  $P_o$ 는 출력 파워이다 [19]. 광섬유의 특정 감쇠는  $\alpha$ 로 표시되며 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha [dB/km] = \frac{10 \log_{10} P_i / P_o}{L} = \frac{a}{L} \quad (4)$$

$$\frac{P_o}{P_i} = 10^{-\left(\frac{\alpha L}{10}\right)} \quad (5)$$

여기서  $L$ 은 광섬유의 길이이다 [20]-[22].

본 논문에서는 그림 1과 같이 Tx에서 VPPM 또는 OPPM에 의한 변조된 펄스가 Rx로 전송된다. 이 환경에서, 변조 방식에 따른 송신 전력 및 수신 전력은 디밍을 적용함으로써 표현된다.

## 2. 변조 방식에 따른 전송 전력 및 수신 전력 분석

전송 전력은 VLC 환경에서 링크 버짓에 따라 계산될 수 있다. 우선, 송신 전력  $P_{r_{LED1}}$ 에 대한 SNR과 LED1의 수신 전력  $P_{t_x}$ 의 관계는 다음과 같다.

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} = \frac{(R \times P_{r_{\leq D1}})^2}{N_0 R_b} \quad (6)$$

$$P_{r_{\leq D1}} = H_{LOS} P_{t_x} \quad (7)$$

여기서  $E_b$ 는 비트당 에너지이며,  $R$ 은 PD 반응도이다.  $N_0$ 는 백색 가우시안잡음 파워스펙트럼밀도이며,  $R_b$ 는 비트레이트이다. 식 (6)과 (7)에 의해 Tx와 LED1 사이의 송신 전력은 다음과 같다.

$$P_{t_x} = \frac{1}{R \times H_{LOS}} \times \sqrt{E_b R_b} \quad (8)$$

분석을 단순화하기 위해 높은 SNR 가정 하에서, BER은  $BER = Q(d_{\min} / 2\sqrt{N_0})$ 와 같이 가장 가까운 두 신호의 거리에 의해 좌우된다. 그리고  $d_{\min}$ 은 유클리드 거리의 최소를 의미한다 [12]. 따라서,  $d_{\min_{VPPM}}$ 와 VPPM의 BER은 다음과 같다.

$$d_{\min_{VPPM}} = \begin{cases} P \sqrt{\frac{2d_c}{R_b}}, & 0 < d_c \leq 0.5 \\ P \sqrt{\frac{2(1-d_c)}{R_b}}, & 0.5 \leq d_c < 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$BER_{VPPM} = \begin{cases} Q\left(P \sqrt{\frac{d_c}{2N_0 R_b}}\right), & 0 < \gamma \leq 0.5 \\ Q\left(P \sqrt{\frac{1-d_c}{2N_0 R_b}}\right), & 0.5 \leq \gamma < 1 \end{cases} \quad (10)$$

여기서  $P$ 는 평균 신호 전력을 나타내며  $P = R \times P_{r_x}$ 이다.  $P_{r_x}$ 은 수신 전력을 의미하고  $d_c$ 는 디밍 변조를 의미한다. 식(6)을 통해서, energy per bit는  $E_b = \frac{(R \times (H_{LOS} P_{t_x}))^2}{R_b}$ 와 같이 쓸 수 있다. 식(10)을 이용하여, VPPM의  $E_b$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E_{b_{VPPM}} = 2N_0 (Q^{-1}(BER))^2 \quad (11)$$

이를 식(8)에 적용하면, VPPM의 전송 전력은 다음과 같다.

$$P_{t_{VPPM}} = \begin{cases} \frac{1}{RH_{LOS}} \sqrt{\frac{2N_0 R_b}{d_c}} Q^{-1}(BER), & 0 < d_c \leq 0.5 \\ \frac{1}{RH_{LOS}} \sqrt{\frac{2N_0 R_b}{(1-d_c)}} Q^{-1}(BER), & 0.5 \leq d_c < 1 \end{cases} \quad (12)$$

다음으로, OPPM 변조에서, 참고문헌 [12]로부터 얻어진  $d_{\min_{OPPM}}$ 를 사용하는 BER 및  $E_b$ 는 각각 다음과 같다.

$$d_{\min_{OPPM}} = P \sqrt{\frac{2(n/w) \log_2(n-w+1)}{w R_b}}, \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n} \quad (13)$$

$$BER_{OPPM} = Q\left(P\sqrt{\frac{(n/w)\log_2(n-w+1)}{2wN_0R_b}}\right),$$

$$\frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n}$$
(14)

$$E_{b_{OPPM}} = \frac{2wN_0}{(n/w)\log_2(n-w+1)} (Q^{-1}(BER))^2$$
(15)

여기서  $(n/w)$ 는 OPPM의 디밍을 의미한다. OPPM 변조는 심볼 기간 동안  $n$  개의 칩으로 분할되고 광 펄스의  $w$ 는 한 행으로 전송된다. OPPM의 디밍제어는  $1 \leq w \leq n-1$ 의 범위에서  $w$ 를 변화시킴으로써 얻어지고  $n$ 으로 고정된다. 따라서, OPPM의 전송전력은 식(15)를 식(8)에 적용함으로써 얻을 수 있다.

$$P_{i_{OPPM}} = \frac{1}{RH_{LOS}} \sqrt{\frac{2wN_0R_b}{(n/w)\log_2(n-w+1)}} Q^{-1}(BER),$$

$$\frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n}$$
(16)

신호가 LED1에서 LED2로 흡을 통해 전송되면, 흡수에 따라 광섬유의 손실이 존재하고 거리에 영향을 받는다. LED1의 송신 전력에 대한 식 (5)를 고려하면, LED2에서 수신된 전력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{r_{LED2}} = P_{i_{LED1}} \times \left(10^{-\frac{\alpha}{10} \sum_{i=1}^n d_i}\right)$$
(17)

마지막으로 Tx에서 전송된 신호가 Rx에서 수신되면 Rx에서 수신된 전력은 다음과 같다

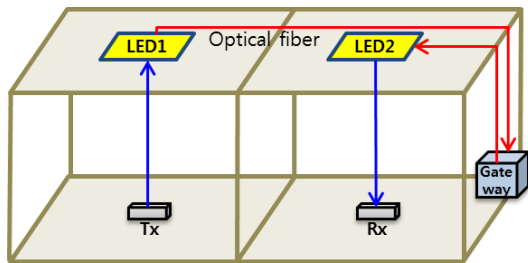


그림 2. VLC 시스템 모델  
Fig. 2. VLC system model

$$P_{rx} = P_{tx} H_{LOS1} \times \left(10^{-\frac{\alpha}{10} \sum_{i=1}^n d_i}\right) \times H_{LOS2}$$
(18)

여기서  $H_{LOS1}$  과  $H_{LOS2}$  는 각각 Tx와 Rx의 방의 채널 값이다. 식(18)에서 이전 계산 한 VPPM과 OPPM의 전송 전력 값을 대입하여 변조 방식에 따른 수신 전력을 산출할 수 있다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 2는 시뮬레이션 환경을 나타냈으며, 그림 1과 같이 구성된 공간이고, 천장에 하나의 LED 조명장치가 있는 일반적인 사무실 공간이다. 통신 단말기가 방의 최하층에 배치되고, 조명과 단말기 사이에 채널이 존재한다고 가정한다. 각 방의 크기는  $5m \times 5m \times 3m$ 이며, 통신에 필요한 게이트웨이는 하나로 설정한다. 따라서 흡의 수는 2이며,  $d_1$  은 8m, 그리고  $d_2$  는 3m이다.

표 1. VLC 시뮬레이션 환경

Table 1. The VLC environment of simulation

Parameter	Value
Room Size	$5m \times 5m \times 3m$
LED array Location	[2.5m, 2.5m, 3m]
Distance of each receiver	50cm
FOV at the receiver	70 deg
Photodiode responsibility	0.4(A/W)
Gain of optical filter	1
Optical concentrator	5
Amplifier bandwidth ( $B_a$ )	50 MHz
Noise bandwidth factor ( $I_2$ )	0.562
Data Rate ( $R_b$ )	100 Mbps

표 1은 IEEE 802.15.7<sup>[14]</sup> 및 기타 참고 문헌<sup>[23]-[25]</sup>에 제시된 시뮬레이션에서 사용되는 매개 변수를 보여준다. 신호는 Tx에서 LED1에 전송되고 LED1에서 광섬유를 거쳐 LED2에서 Rx에 전달된다.

그림 3은 그림 2의 환경에서 디밍에 따른 각 변조 방식의 송신 전력 및 수신 전력을 나타낸다. 우선, 송신 전력 그래프에서 디밍이 증가함에 따라 OPPM은 연속적인 펄스를 보내고 큰 오름차순 곡선을 그리나 VPPM 변조

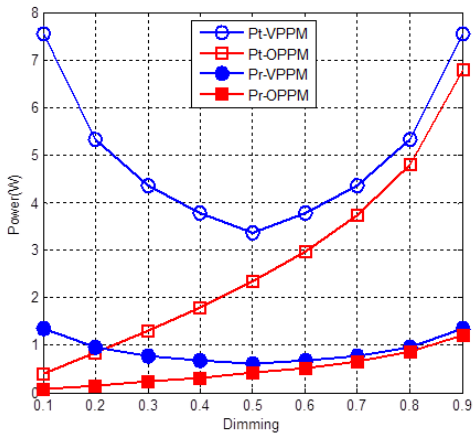
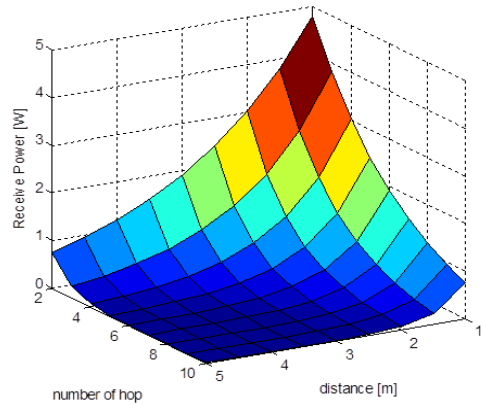
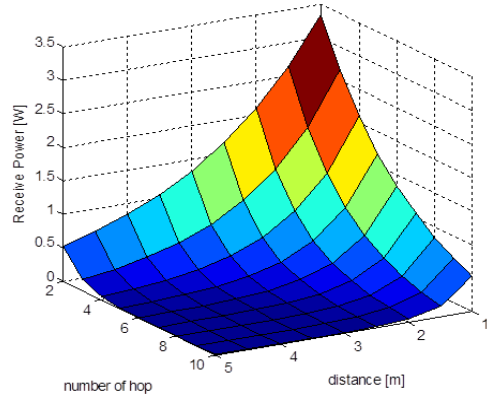


그림 3. 변조방식에 의한 송수신 전력  
 Fig. 3. Transmission power and received power according to modulation

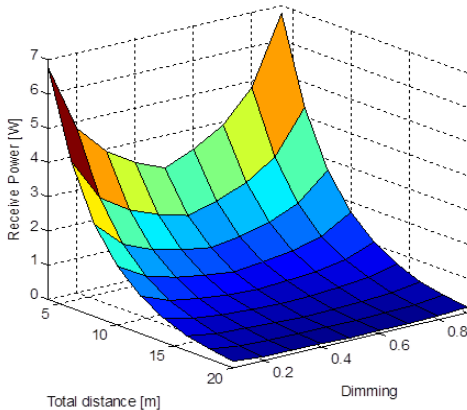


(a) VPPM

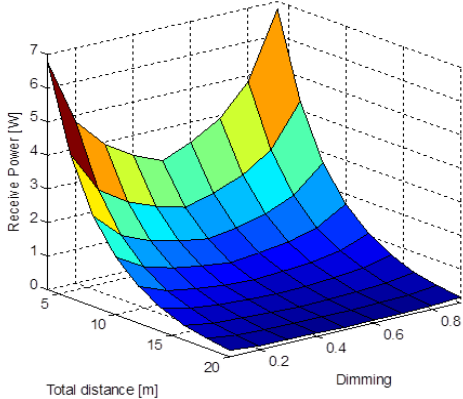


(b) VPPM

그림 5. 50% 디밍일 때 홉수와 거리에 따른 수신파워  
 Fig. 5. Received power vs. number of hop and distance, if dimming 50%



(a) VPPM



(b) VPPM

그림 4. 2 홉에서 총거리와 디밍에 따른 수신파워  
 Fig. 4. Received power vs. Total distance and dimming, if hop 2

보다 전송 전력이 낮다. VPPM은 디밍이 50% 일 때 가장 낮은 전송 전력을 갖는다. 또한 수신된 전력의 그래프는 송신 전력 형태의 그래프와 동일하며, VPPM의 수신 전력은 OPPM보다 크다. VPPM의 송신 전력과 수신 전력은 디밍이 0.1일 때, 6W로 가장 큰 차이를 보이며, 디밍이 0.5일 때, 2.5W로 가장 작은 차이를 보인다. 마찬가지로 OPPM의 경우, 5.5W에서 0.1W 사이의 차이를 보인다.

그림 4는 홉의 수가 2 일 때, 총 거리 및 디밍에 대한 수신 전력을 나타낸다. 이것은 두 개의 방에서의 경우이며, 총 거리로 나타내 분석하였다. VPPM의 경우 총 거리가 5m 일 때 최대 수신 전력이 약 6.5W이다. 이것을 그림 3의 환경에서 총 거리 11m와 비교하면 수신 전력은 약 1.5W이고 거리는 약 2 배이지만 수신 전력은 약 4 배 차이가 난다. OPPM의 경우 총 거리가 5m 일 때, 최대 수

신 전력이 약 6W이다. 그림 3의 환경에서 총 수신 거리가 약 1W 인 총 거리 11m와 비교하면 두 배의 거리 차이가 있지만 수신 전력은 6 배 차이가 난다. 그림 4를 보면 거리가 멀어 질수록 수신 전력이 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

그림 2의 환경과는 달리 그림 5의 시뮬레이션 환경은 다수의 게이트웨이를 가지고 있다. 그림 5는 dimming이 50 % 일 때 홉의 수와 거리에 대한 수신 전력을 보여준다. 홉 수가 2이고 각 홉의 거리가 1m 일 때 VPPM과 OPPM 모두 최대 수신 전력을 가진다. 이 경우, VPPM 및 OPPM에서 약 5W 및 3.5W 전력이 각각 수신되며, 홉 수가 증가하고 거리가 멀어 질수록 VPPM과 OPPM의 수신 전력은 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

#### IV. 결 론

VLC에 사용되는 백색 LED는 기존의 광원보다 약 20 배, 형광등보다 5 배 적은 전력을 소비한다. 이러한 절약 측면에서 볼 때, VLC 기술은 무선 통신 분야에서 상당한 주목을 받고 있다. 멀티 홉 환경에서 초고속 VLC 액세스를 위한 더 나은 방안은 광섬유를 사용하는 것이다. 본 연구에서는 이러한 LED와 광섬유를 이용한 VLC기반 멀티 홉 시스템에서 디밍 제어 및 홉 수에 따라 변조 방식의 송신 전력과 수신 전력을 시뮬레이션하여 시스템을 분석하였다. 변조에 따른 송신 전력 및 수신 전력에서 디밍이 증가함에 따라, OPPM은 연속적인 펄스를 보내고 커브를 상승 시키지만, VPPM보다 적은 전력 강도를 갖는다. 또한 홉의 수가 2일 때 수신 전력 대비 총 거리 및 디밍에서의 총 거리가 5m 일 때, VPPM과 OPPM의 수신 전력은 각각 6.5W 및 6W으로 나타났다. 수신된 전력은 거리가 증가함에 따라 급속히 감소하는 것을 보인다. 마지막으로, 수신 전력 대 홉 수 및 디밍이 50 % 인 거리에서 홉 수가 증가하고 거리가 길수록 VPPM 및 OPPM의 수신 전력은 급속히 감소하는 것을 알 수 있다.

멀티 홉 VLC 환경에서 디밍 제어를 이용한 각 변조 방식의 전력 성능에 대한 다양한 결과를 도출했고 이 결과들을 통해 VLC기반의 멀티홉 기술과 디밍제어에 의한 전력성능 향상을 위한 연구에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

- [1] M. Kavehrad, "Sustainable energy-efficient wireless applications using light," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 12, pp. 66 - 73, Dec. 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/mcom.2010.5673074>
- [2] B.G. Choi, M.J. Lee and K.S. Kim, "Performance Analysis of the VLC System applying SR-ARQ," *The journal of the Institute of Internet Broadcasting and Communication*, vol. 15, no. 4, pp. 127-134, Aug. 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/jiibc.2015.15.4.127>
- [3] A. Jovicic, J. Li, et al., "Visible Light Communication: Opportunities, Challenges and the Path to Market," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 51, no 12, pp. 26 - 32, Dec. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/mcom.2013.6685754>
- [4] M.J. Lee, B.J. Lee, S.L. Ju, Y.W. Kim and K.S. Kim, "Performance Comparison of Modulation Schemes according to the Dimming Control in MIMO-VLC System." *The journal of the Institute of Internet Broadcasting and Communication*, vol. 14, no. 4, pp. 63-69, Aug. 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/jiibc.2014.14.4.63>
- [5] D. Tsonev et al., "A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride  $\mu$ LED," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, no. 7, pp. 637 - 640, Apr. 1, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/lpt.2013.2297621>
- [6] Y. Wang et al., "875-Mb/s asynchronous bi-directional 64QAM-OFDM SCM-WDM transmission over RGB-LED-based visible light communication system," in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. Expo. Nat. Fiber Opt. Eng.*, Mar. 2013, pp. 1 - 3, paper. OTh1G.3.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/ofc.2013.oth1g.3>
- [7] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," *Communications Magazine*, IEEE, vol. 49, no. 9, pp. 56 - 62, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/mcom.2011.6011734>

- [8] S. Rajagopal, R. Roberts, and S.-K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and Dimming support," *Communications Magazine*, IEEE, vol. 50, no. 3, pp. 72 - 82, March 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/mcom.2012.6163585>
- [9] T. Komine and M. Nakagawa, "Integrated system of white LED visiblelight communication and power-line communication," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 71 - 79, Feb. 2003.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/pimrc.2002.1045482>
- [10] Y Wang, N Chi, Y Wang, L Tao, and J Shi, "Network Architecture of a High-Speed Visible Light Communication Local Area Network," *IEEE Photonics Tech. Letters*, VOL. 27, NO. 2, JANUARY 15, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/lpt.2014.2364955>
- [11] K. Lee and H. Park, "Modulations for Visible Light Communications with Dimming Control," *IEEE Photonics Tech. Letters*, vol.23, no. 16, Aug. 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/lpt.2011.2157676>
- [12] H. Park and J. R. Barry, "Modulation analysis for wireless infrared communications", in *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2, pp.1182 - 1186.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/icc.1995.524287>
- [13] A. B. Siddique and M. Tahir, "Joint brightness control and data transmission for visible light communication systems based on white LEDs," in *Proc. 8th Annu. IEEE Consum. Commun. Netw. Conf. Smart Spaces Pers. Area Netw.*, Jan. 2011, pp. 1026 - 1030.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ccnc.2011.5766321>
- [14] 802.15.7 PHY and MAC Standard for Short Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, *IEEE Std.*, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2011.6016195>
- [15] T. Ohtsuki, I. Sasase, and S. Mori, "Lower bounds on capacity and cutoff rate of differential overlapping pulse position modulation in optical direct-detection channel," *IEICE Trans. Comm.*, vol. E77-B, pp. 1230 - 1237, Oct. 1994.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/icc.1994.368797>
- [16] J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications," *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265 - 298, Feb. 1997.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2700-8>
- [17] V. Jungnickel, V. Pohl, S. Noenning, and C. von Helmolt, "A physical model for the wireless infrared communication channel," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 631 - 640, 2002.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/49.995522>
- [18] J.B.Carruthers and J.M.Kahn, "Modeling of Nondirected Wireless Infrared Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no.10, pp.1260-1268, 1997.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/icc.1996.541403>
- [19] R. Róka and F. Čertík, "Modeling of environmental influences at the signal transmission in the optical transmission medium," *International Journal of Electrical Communication Networks and Information Security*, vol. 4, no. 3, pp. 144 - 162, 2012.
- [20] Binh, L.N., *Optical Fiber Communications Systems*, CRC Press, ISBN 978-1-4398-0620-3, Boca Raton, United States of America, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ofc.2003.315883>
- [21] J. R. F. da Rocha and J. J. O'Reilly, "Linear direct-detection fiber-optic receiver optimization in the presence of intersymbol interference," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-34, no. 4, pp. 365 - 374, April 1986.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/tcom.1986.1096543>
- [22] J. E. Mazo and J. Salz, "On optical data communication via direct detection of light pulses," *Bell Sys. Tech. Journal*, vol. 55, pp. 347 - 369, March 1976.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1976.tb03320.x>
- [23] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 50, pp. 100 - 107, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/tce.2004.1277847>
- [24] J. Grubor, S. Randel, K. D. Langer, and J. W.

Waleski, "Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting," J. Lightw. Technol., vol. 26, pp. 3883 - 3892, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.1109/jlt.2008.928525>

[25] Z. Huang and Y. Ji, "Efficient user access and lamp selection in LED based visible light communication network," Chin. Opt. Lett., vol. 10, no. 5, pp. 6021 - 6025, 2012.

DOI: <https://doi.org/10.3788/col201210.050602>

### 김 경 석(정회원)



- 1989년 1월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
- 1999년 1월 ~ 2002년 2월 : University of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학원 졸업 (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2004년 8월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 책임연구원
- 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 전북대학교 생체정보공학부 전임 강사
- 2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 부교수  
<주관심분야 : 5G Massive-MIMO, 전파채널모델링, 위성보안망분석, Cognitive Radio, 전력선통신, 가시광통신, 디지털라디오, 전파감시/관리시스템>

### 저자 소개

#### 김 주 석(정회원)



- 2007년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2009년 2월 : 충북대학교 전파공학과 대학원 졸업 (공학석사)
- 2015년 2월 : 충북대학교 전파통신공학과 대학원 졸업 (공학박사)
- 2014년 5월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 사업화부문 연구원

<주관심분야 : 가시광 통신, 전파채널모델링, MIMO\_OFDM, 디지털라디오, Cognitive Radio>

#### 여 봉 구 (정회원)



- 2014년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2016년 2월 : 충북대학교 전파통신공학과 대학원 졸업 (공학석사)
- 2016년 10월 ~ 현재 : (주)에버정보기술 연구원

<주관심분야 : 가시광 통신, Cognitive Radio, 전력선 통신>