

http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.4.63

IIBC 2014-4-10

## MIMO-VLC에서 디밍제어에 따른 변조방식들의 성능 비교

### Performance Comparison of Modulation Schemes according to the Dimming Control in MIMO-VLC System

이민정\*, 이병진\*\*, 주상임\*\*\*, 김용원\*\*\*\*, 김경석\*\*\*\*\*

Min-Jung Lee\*, Byung-Jin Lee\*\*, Sang-Lim Ju\*\*\*, Yong-Won Kim\*\*\*\*,  
Kyung-Seok Kim\*\*\*\*\*

**요약** 가시광 무선통신은 LED의 깜박임(ON/OFF)을 이용한 통신 방식으로, 인간의 시신경 인식의 한계로 조명의 기능도 유지된다. VLC 시스템에서 사용되는 LED의 밝기 조절은 에너지 절약과 생활 혜택을 제공하는데 필요한 중요한 요소이다. 또한, VLC 시스템이 발전하면서 MIMO 기술은 안테나 수에 비례하는 채널 용량을 얻을 수 있다는 점에서 큰 주목을 받아오고 있다. 이에 본 논문에서는 VLC 시스템의 MIMO 방식 중 하나인 RC방식으로, 4개의 변조 방법인 RZ-OOK, VPPM, MPPM, OPPM을 사용하여 디밍에 따른 통신 성능을 분석하였다. 이에 대해 시뮬레이션 한 결과, 4개의 변조들 중 power requirement 측면에서는 MPPM 변조가, spectral efficiency와 bandwidth requirement 측면에서는 OPPM 변조가 성능이 좋음을 확인하였고, 디밍에 따라서 각 변조들의 통신 성능이 달라짐을 확인하였다.

**Abstract** Visible light communication is a communication method using an LED's blinking(ON/OFF), it has a feature of light because of the limit of perception by the human's optic nerve. LED' dimming control used in the VLC system is important factor needed to provide energy saving and life benefits. With advances in VLC system, MIMO technology has received much attention in that it can be obtain channel capacity proportionate to the number of antenna. Therefore, in this paper, with RC method which is one of the MIMO style in VLC system, it is compared communication performance using RZ-OOK, VPPM, MPPM and OPPM. As a result of the simulation was run against this, MPPM works well in terms of Power requirement and OPPM works well in terms of Spectral efficiency and Bandwidth requirement, also it was confirmed that there is a significant impact on the communication performance of each modulation scheme according to the dimming.

**Key Words** : VLC, MIMO, Repetition code, Dimming, RZ-OOK, VPPM, MPPM, OPPM

\*준회원 충북대학교 전자통신공학과

\*\*준회원 충북대학교 전자통신공학과

\*\*\*준회원 충북대학교 전자통신공학과

\*\*\*\*준회원 충청지역사업평가원

\*\*\*\*\*정회원 충북대학교 정보통신공학과 (교신저자)

접수일자 : 2014년 6월 13일, 수정완료 : 2014년 7월 13일

게재확정일자 : 2014년 8월 8일

Received: 13 June, 2014 / Revised: 13 July, 2014

Accepted: 8 August, 2014

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

Department of Electrical and Electronic Engineering, Chungbuk National University, Korea

## I. 서 론

가시광 무선통신(Visible Light Communication: VLC)은 인간의 눈으로 볼 수 있는 광을 이용한 통신으로, 매우 짧은 시간에 전기에서 빛으로 바꾸는 LED의 깜박임(ON/OFF)을 이용한 송수신을 기본 원리로 통신을 수행한다. 또한, 깜박임(ON/OFF)은 발생하지만 인간의 시신경 인식의 한계로 계속적으로 켜진 것으로 인식되기 때문에 조명의 기능도 유지된다<sup>[1]</sup>. VLC 시스템에 사용되는 LED는 생활과 밀접하게 접촉해 있기에 LED의 밝기 조절(dimming control)은 에너지 절약과 생활 혜택을 제공하는데 필요한 중요한 요소이다. 디밍을 위한 변조 방식으로는 VPPM이 널리 사용되고 있으며 플리커 방지, 밝기 조절, 최대 밝기 제공이라는 세 가지 주요 기능이 제공된다. 또한, VLC 시스템이 발전하면서 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 기술은 안테나 수에 비례하는 채널 용량을 얻을 수 있다는 점에서 큰 주목을 받아오고 있다. MIMO 기술은 안테나를 2개 이상으로 늘려 데이터를 여러 경로로 전송하는 기술로, 수신단에서 각각의 경로로 수신된 신호를 검출해 간섭을 줄인다. 이 기술은 이동 통신 분야의 중요한 연구 주제로 다양한 범위에서 발전되고 있다<sup>[2]</sup>.

본 논문에서는 VLC 시스템의 MIMO 방식으로, space diversity 기술 중에 다수의 안테나에 각각 같은 데이터를 전송하는 repetition code(RC) 방식을 택하였고, 4개의 변조 방법인 RZ-OOK, VPPM, MPPM, OPPM을 사용하여 디밍에 따른 통신 성능을 분석하였다. 통신 성능 분석 항목은 power requirement, spectral efficiency, bandwidth requirement이며, power requirement를 통해 주어진 BER을 달성하기 위해 요구되는 전력이 어느 정도인지 알아 볼 수 있다. 또한, spectral efficiency를 통해 고정 된 대역폭에서 데이터 처리량을 알아 볼 수 있으며, bandwidth requirement를 통해 정보를 전송할 수 있는 능력을 비교 해볼 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 4개의 변조 방식 각각의 디밍 제어 방법 및 범위에 대해 알아보고, 3장에서는 [5]에서 제시한 PAM 변조의 BER을 이용하여 VLC 시스템의 RC-MIMO 방식 BER을 도출하기 위한 SNR을 유도한다. 4장에서는 3장에서 유도한 식을 이용해 디밍에 따른 각 변조별 power requirement 식을 도출해 내며, spectral efficiency 및 bandwidth requirement

또한 각 변조별로 분석한다. 5장에서 시뮬레이션 결과를 분석하고, 6장에서는 결론을 맺는다.

## II. 변조 방식에 따른 디밍 제어

### 1. Return-to-zero OOK (RZ-OOK)<sup>[3]</sup>

RZ-OOK 변조는 심볼 기간인 T 동안 광 펄스를 전송 후 0으로 복귀함으로써 1bit를 나타내고, 또한 T기간 동안 광 펄스를 전송하지 않음으로써 0bit를 나타낸다. 디밍 제어는 펄스폭을  $0 < D_c \leq 1$  범위로 변화시켜 밝기 조절이 가능하며, 여기서  $D_c$ 는 듀티 사이클이다. RZ-OOK의 디밍 범위( $d_c$ )는 다음과 같다.

$$0 < d_{c_{RZ-OOK}} = \frac{D_c}{2} \leq \frac{1}{2} \quad (1)$$

### 2. Variable PPM(VPPM)<sup>[3]</sup>

VPPM 변조는 PWM과 2-PPM의 조합으로, 통신이 가능함과 동시에 디밍 조절이 가능하다. 여기서 2-PPM은 L=2인 형태로 T기간 동안 한 개의 광 펄스만 전송하고, 두 개 슬롯 중 한 슬롯은 0이고 나머지 슬롯은 1의 형태이므로 100% 밝기를 제공할 수 없다. VPPM의 디밍 범위( $d_c$ )는 다음과 같다.

$$0 < d_{c_{VPPM}} = D_c < 1 \quad (2)$$

그림 1은 RZ-OOK와 VPPM의 변조 방법과 펄스의 폭을 조절한 듀티 사이클이 0.8일 때의 예를 보여준다.

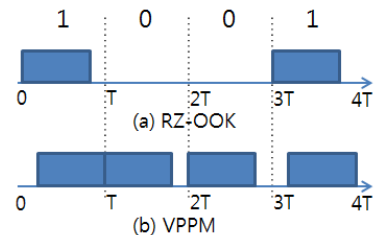


그림 1.  $D_c$ 가 0.8일 때 RZ-OOK와 VPPM 변조 예  
Fig. 1. Example of symbol structures with  $D_c = 0.8$  of RZ-OOK and VPPM

### 3. Multiple PPM (MPPM)<sup>[3][4]</sup>

MPPM 변조에서 심볼 기간인  $T$ 동안  $n$ 개의 칩으로 나뉘지고,  $w$ 개의 광 펄스가 전송되며,  $\binom{n}{w}$ -MPPM으로 표기 한다. 심볼 기간은  $T = \log_2 L / R_b$ 이며,  $R_b$ 는 bit rate이고, 코드워드의 총 수는  $L = \frac{n!}{w!(n-w)!}$ 이다. MPPM의 디밍 제어는  $n$ 을 고정시키고  $w$ 를  $1 \leq w \leq n-1$  범위 안에서 변화시킨다. MPPM의 디밍 범위( $d_c$ )는 다음과 같다.

$$\frac{1}{n} < d_{cMPPM} = \frac{w}{n} \leq \frac{n-1}{n} \quad (3)$$

### 4. Overlapping PPM (OPPM)<sup>[4]</sup>

OPPM 변조는 MPPM의 특별한 경우로, 심볼 기간인  $T = \log_2 L / R_b$ 는  $n$ 개의 칩으로 나뉘지고  $w$ 개의 광 펄스가 전송된다는 것은 MPPM과 같지만 여기서  $w$ 개의 광 펄스는 연속적인 형태로 전송된다는 점이 다르다. 그림 2에서 듀티 사이클이 0.8일 때의 예를 나타내며, 그 차이를 보여준다. MPPM과 같이 OPPM의 듀티 사이클은  $w/n$ 이며, 디밍 범위( $d_c$ )는 다음과 같다.

$$\frac{1}{n} < d_{cOPPM} = \frac{w}{n} \leq \frac{n-1}{n} \quad (4)$$

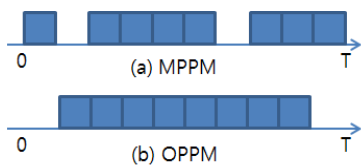


그림 2.  $D_c$ 가 0.8일 때 MPPM과 OPPM 변조 예  
 Fig. 2. Example of symbol structures with  $D_c = 0.8$  of MPPM and OPPM

## III. MIMO-VLC 시스템의 성능 도출을 위한 SNR 유도

[5]에서는 SISO 및 MIMO 방식 하에서 PAM 변조의 시스템 성능(BER)을 분석하였다. 특히, MIMO 기법은 RC 방식을 사용하였다.

$$BER_{SISO} \geq \frac{2(M-1)}{M \log_2(M)} Q \left( \frac{1}{M-1} \sqrt{\frac{E_{RX}}{N_0}} \right) \quad (5)$$

$$BER_{RC} \geq \frac{2(M-1)}{M \log_2(M)} Q \left( \frac{1}{M-1} \sqrt{\frac{E_s}{N_0 N_t^2} \sum_{n_r=1}^{N_r} \left( \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t} \right)^2} \right) \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)의 차이점은 SNR 부분으로, 다음과 같이 비교해 볼 수 있다.

$$SNR_{SISO} = \frac{E_{RX}}{N_0} \quad (7)$$

$$SNR_{RC} = \frac{E_s}{N_0 N_t^2} \sum_{n_r=1}^{N_r} \left( \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t} \right)^2 \quad (8)$$

식 (7)은 SISO 방식의 SNR로,  $E_{RX}$ 는 수신된 전기적 에너지이고,  $N_0$ 는 잡음 전력 스펙트럼 밀도이다. 식 (8)은 RC-MIMO 방식의 SNR이며,  $N_t$ 와  $N_r$ 는 송신기와 수신기 개수,  $h_{n_r n_t}$ 는 채널계수,  $E_s = (rI)^2 T_s$ 는 강도 변조된 광신호의 방출된 전기에너지를 의미한다. 식 (7)의  $E_{RX}$ 는 bit 에너지( $E_b$ )이므로 데이터 속도를 고려하면 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$SNR_{SISO} = \frac{E_b}{N_0} = \frac{P}{R_b N_0} \quad (9)$$

여기서  $P$ 는 평균 광 파워이고,  $R_b$ 는 bit rate이다. 또한 식 (8)의  $E_s = (rI)^2 T_s$ 는  $P^2 / R_b$ 로 나타낼 수 있고, 이것을 VLC 시스템에서 RC-MIMO 방식의 SNR로 대입하면 다음 식 (10)과 같다.

$$SNR_{RC} = \frac{P^2}{N_0 R_b N_t^2} \sum_{n_r=1}^{N_r} \left( \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t} \right)^2 \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)은 VLC 시스템에서 SISO와 RC-MIMO 방식의 BER식의 차이로, 이 두 식을 이용하면 앞으로 분석할 변조들의 SISO 방식 BER을 RC-MIMO 방식의 BER 식으로 도출이 가능하다.

## IV. 디밍에 따른 RC-MIMO 방식의 통신성능 도출

### 1. Power Requirement

Power requirement는 주어진 BER을 달성하기 위해 요구되는 광 파워이다. 이를 이용하여 주어진 bit rate에서 해당 BER을 달성하기 위해 요구되는 전력을 알아 볼 수 있다. RC-MIMO 방식에서 각 변조들의 power requirement를 알아보기 위해 먼저 minimum euclidean distance와 Q-function으로 SISO방식의 BER 식을 구해보면 다음과 같다<sup>[4][6]</sup>.

$$BER_{RZ-OOK} \approx Q\left(P\sqrt{\frac{2d_c}{N_0R_b}}\right) \quad 0 < d_c \leq 0.5 \quad (11)$$

$$BER_{VPPM} \approx \begin{cases} Q\left(P\sqrt{\frac{d_c}{2N_0R_b}}\right) & 0 < d_c \leq 0.5 \\ Q\left(P\sqrt{\frac{1-d_c}{2N_0R_b}}\right) & 0.5 \leq d_c < 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$BER_{MPPM} \approx Q\left(P\sqrt{\frac{n \log_2\left(\frac{n}{w}\right)}{2w^2N_0R_b}}\right) \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n} \quad (13)$$

$$BER_{OPPM} \approx Q\left(P\sqrt{\frac{(n/w)\log_2(n-w+1)}{2wN_0R_b}}\right) \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n} \quad (14)$$

RC-MIMO 방식의 BER을 도출해 내기위해 식 (11)에서 식 (14)까지 각각 안에서 식 (9)에 해당하는 부분을 식 (10)으로 대입하였다. 표 1은 위 방법으로 도출해 낸 RC-MIMO 방식의 BER과 그 식을 통해 얻은 power requirement이다.

모든 변조 방식이 같은 BER을 달성한다는 전제하에, 각 변조의 power requirement를 간단하게 비교하기 위해서 NRZ-OOK를 benchmark로 사용하였고, NRZ-OK 역시 위와 같은 과정으로 power requirement를 구하면 다음과 같다.

$$P_{NRZ-OOK} = \sqrt{\frac{N_0R_bN_t^2}{\sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}} Q^{-1}(BER) \quad (15)$$

표 1에서 각 변조들의 power requirement 식에 식 (15)를 이용하면 다음과 같은 최종 식을 얻을 수 있다.

$$\hat{P}_{RZ-OOK} = \sqrt{\frac{1}{2d_c}} \quad 0 < d_c \leq 0.5 \quad (16)$$

표 1. 각 변조들의 RC-MIMO 방식의 BER과 power requirement

Table 1. RC-MIMO BER and power requirement of each modulation scheme

	BER	Power requirement
RZ-OOK	$Q\left(P\sqrt{\frac{2d_c}{N_0R_bN_t^2} \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}\right) \quad 0 < d_c \leq 0.5$	$\sqrt{\frac{N_0R_bN_t^2}{2d_c \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}} Q^{-1}(BER) \quad 0 < d_c \leq 0.5$
VPPM	$\begin{cases} Q\left(P\sqrt{\frac{d_c}{2N_0R_bN_t^2} \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}\right) & 0 < d_c \leq 0.5 \\ Q\left(P\sqrt{\frac{1-d_c}{2N_0R_bN_t^2} \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}\right) & 0.5 \leq d_c < 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \sqrt{\frac{2N_0R_bN_t^2}{d_c \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}} Q^{-1}(BER) & 0 < d_c \leq 0.5 \\ \sqrt{\frac{2N_0R_bN_t^2}{(1-d_c) \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}} Q^{-1}(BER) & 0.5 \leq d_c < 1 \end{cases}$
MPPM	$Q\left(P\sqrt{\frac{n \log_2\left(\frac{n}{w}\right)}{2w^2N_0R_bN_t^2} \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}\right) \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n}$	$\sqrt{\frac{2w^2N_0R_bN_t^2}{n \log_2\left(\frac{n}{w}\right) \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}} Q^{-1}(BER) \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n}$
OPPM	$Q\left(P\sqrt{\frac{(n/w)\log_2(n-w+1)}{2wN_0R_bN_t^2} \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}\right) \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n}$	$\sqrt{\frac{2wN_0R_bN_t^2}{(n/w)\log_2(n-w+1) \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_t} h_{n_r n_t}^2}} Q^{-1}(BER) \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n}$

$$\hat{P}_{VPPM} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{d_c}} & 0 < d_c \leq 0.5 \\ \sqrt{\frac{2}{1-d_c}} & 0.5 \leq d_c < 1 \end{cases} \quad (17)$$

$$\hat{P}_{MPPM} = \sqrt{\frac{2w^2}{n \log_2 \binom{n}{w}}} \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n} \quad (18)$$

$$\hat{P}_{OPPM} = \sqrt{\frac{2w}{(n/w) \log_2 (n-w+1)}} \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n} \quad (19)$$

## 2. Spectral efficiency

Spectral efficiency는 스펙트럼 효율로 단위는 bps/Hz이다. 이를 통해 고정된 대역폭에서 데이터 처리량을 알아볼 수 있으며, 각 변조의 spectral efficiency 비교를 통해 통신 성능을 분석할 수 있다.

RC-MIMO는 space coding 방식으로, 모든 송신기에 동일한 데이터가 전송된다. 안테나 개수가 증가하더라도 bit rate는 변하지 않으므로, RC-MIMO 방식의 spectral efficiency는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\nu = \frac{R_b}{B} \quad (20)$$

여기서  $B$ 는 bandwidth requirement이며,  $B = \frac{1}{T} = R_b$ 이므로, RZ-OOK의 경우, bandwidth requirement와 spectral efficiency는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B_{RZ-OOK} = \frac{R_b}{2d_c} \quad 0 < d_c \leq 0.5 \quad (21)$$

$$\nu_{RZ-OOK} = 2d_c \quad 0 < d_c \leq 0.5 \quad (22)$$

VPPM, MPPM, OPPM 변조들 역시 이와 같은 과정으로 구할 수 있으며, 표 2에 RZ-OOK와 함께 bandwidth requirement와 spectral efficiency를 나타내었다.

표 2. 각 변조별 bandwidth requirement와 spectral efficiency

Table 2. Bandwidth requirement and spectral efficiency by each modulation scheme

	Bandwidth requirement	Spectral efficiency
RZ-OOK	$\frac{R_b}{2d_c} \quad 0 < d_c \leq 0.5$	$2d_c \quad 0 < d_c \leq 0.5$
VPPM	$\begin{cases} \frac{R_b}{d_c} & 0 < d_c \leq 0.5 \\ \frac{R_b}{1-d_c} & 0.5 \leq d_c < 1 \end{cases}$	$\begin{cases} d_c & 0 < d_c \leq 0.5 \\ 1-d_c & 0.5 \leq d_c < 1 \end{cases}$
MPPM	$\frac{nR_b}{\log_2 \binom{n}{w}} \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n}$	$\frac{\log_2 \binom{n}{w}}{n} \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n}$
OPPM	$\frac{(n/w)R_b}{\log_2 (n-w+1)} \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n}$	$\frac{\log_2 (n-w+1)}{(n/w)} \quad \frac{1}{n} \leq d_c \leq \frac{n-1}{n}$

## V. 시뮬레이션 결과 및 분석

IV장에서 도출한 식을 토대로 각 변조의 디밍에 따른 power requirement와 spectral efficiency, bandwidth requirement를 시뮬레이션한 후 분석하였다.

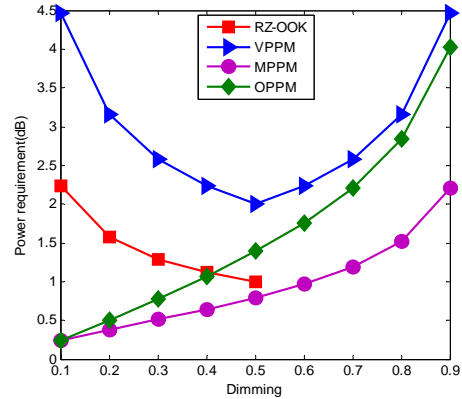


그림 3. 각 변조의 Power requirement

Fig. 3. Power requirement of each modulation scheme

그림 3은 각 변조 별 디밍에 따른 power requirement를 나타낸다. 디밍이 0.1인 곳에서 MPPM과 OPPM이 같은 이유는 이 때 두 변조는  $w=1, n=10$ 인 10-PPM 형태이기 때문이다. 그러나 디밍이 커질수록, 연속적인 펄

스를 전송하는 OPPM이 그렇지 않은 MPPM에 비해 큰 상승 곡선을 그리며 더 큰 전력을 필요로 한다. RZ-OOK와 VPPM은 전체 디밍 범위 중 0.5일 때 가장 적은 전력을 필요로 하며, 4개의 변조 중 VPPM이 다른 변조들에 비해 최대 2배 정도의 가장 많은 전력을 필요로 함을 확인할 수 있다. 그림 4는 각 변조 별 디밍에 따른 spectral efficiency를 나타낸다. 디밍이 0.1일 때 MPPM과 OPPM이 같은 것 또한 두 변조가 10-PPM 형태이기 때문이다. 4개의 변조들 중 OPPM에서 스펙트럼 효율이 가장 높은 것을 확인할 수 있으며, 디밍이 0.7일 때 1.4bps/Hz로 제일 높다. RZ-OOK 또한 스펙트럼 효율이 좋은 편이지만 디밍 지원이 0.5까지만 가능하다는 단점이 있다. 반면, VPPM은 디밍이 0.5일 때 0.5bps/Hz로 최솟값을 갖지만 다른 변조들에 비해 낮은 스펙트럼 효율을 보인다.

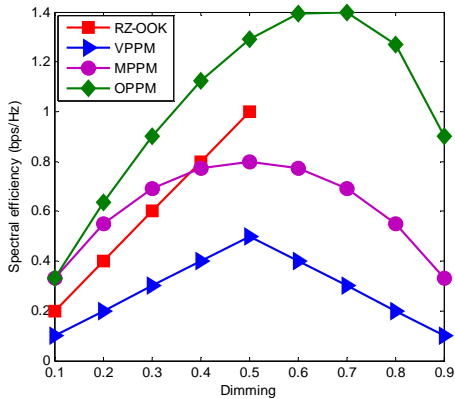


그림 4. 각 변조의 Spectral efficiency  
Fig. 4. Spectral efficiency of each modulation scheme

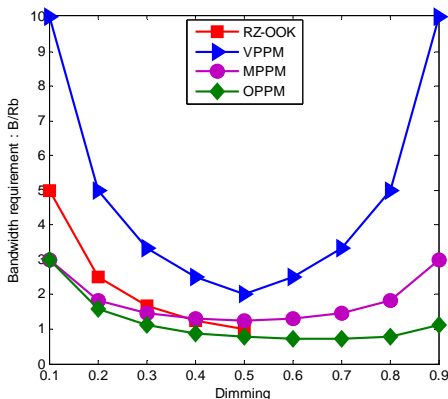


그림 5. 각 변조의 Bandwidth requirement  
Fig. 5. Bandwidth requirement of each modulation scheme

그림 5는 각 변조 별 디밍에 따른 bandwidth requirement를 나타낸다. 전반적인 디밍 범위에서 변조들은 디밍이 0.5일 때 가장 작은 대역폭을 필요로 하는 것을 볼 수 있다. 변조들 중에서는 OPPM 변조가 전체 디밍 범위에서 가장 작은 대역폭을 요구 하며, VPPM 변조는 RZ-OOK 변조의 약 2배, OPPM 변조와 MPPM 변조의 약 3배로 가장 큰 대역폭을 요구함을 볼 수 있다. 전체적으로 비교해보면, power requirement 측면에서는 더 적은 전력을 요구하는 MPPM 변조가, spectral efficiency와 bandwidth requirement 측면에서는 더 좋은 스펙트럼 효율성과 작은 대역폭을 요구하는 OPPM 변조가 성능이 좋다. 또한, 각 변조들의 성능은 대체적으로 디밍이 0.5일 때 가장 성능이 좋으며, 각 변조들은 디밍에 따라 성능이 달라짐을 확인할 수 있다.

## VI. 결론

VLC 시스템에서 LED의 밝기 조절(dimming control)은 에너지 절약과 생활 혜택 제공에 중요한 요소이며, MIMO 기술은 안테나 수에 비례하는 채널 용량을 얻을 수 있다는 점에서 이동 통신 분야의 중요한 연구 주제로 다양한 범위에서 발전되고 있다.

VLC 시스템에서 디밍에 따른 RC-MIMO 방식의 변조 별 성능을 분석하기 위해 [5]에서 제시한 PAM 변조의 RC 방식을 이용하여 유도하였다. 유도한 식을 이용해 각 변조의 SISO BER 식을 RC-MIMO 방식으로 도출해 냈으며, power requirement, spectral efficiency, bandwidth requirement 세 부분에서 각 변조의 성능을 분석하였다.

시뮬레이션 결과 power requirement 측면에서 MPPM 변조가 전체적인 디밍에서 가장 적은 전력을 필요로 하며, VPPM 변조는 다른 변조들의 최대 2배의 전력을 요구한다. Spectral efficiency 측면에서는 OPPM 변조가 전반적으로 가장 높은 스펙트럼 효율을 보이며, 디밍이 0.7일 때 1.4bps/Hz로 가장 높다. 반면, VPPM 변조는 다른 변조들에 비해 낮은 스펙트럼 효율을 보인다. RZ-OOK 변조의 경우, power requirement와 spectral efficiency에서 좋은 편에 속하지만 디밍 지원이 0.1부터 0.5까지만 가능하다는 단점이 있다.

이 연구 결과는 가시광 통신 시스템에서 LED의 밝기

조절을 적용하고, MIMO 기술을 적용하여 통신성능을 향상 시킬 기술에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] Wonda Kim, Industry and Technology trend Analysis of Visible Light Communication (VLC), BIR, 2011.
- [2] Byunghyo Shim, Byungju Lee, "Evolution of MIMO Technology", The Journal of Korea Information and Communications Society (J-KICS) '13-08 Vol.38A No.08, 2013.
- [3] K. Lee and H. Park, "Modulations for Visible Light Communications with Dimming Control." Photonics Technology Letters, IEEE 23.16 (2011): 1136-1138.
- [4] H. Park and J. R. Barry, "Modulation analysis for wireless infrared communications," in Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Commun., vol. 2, pp.1182 - 1186.
- [5] T. Fath and H. Haas, "Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments," IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 2, pp. 733 - 742, 2013.
- [6] B. Bai, Z. Xu, and Y. Fan, "Joint LED dimming and high capacity visible light communication by overlapping PPM," The 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference, pp. 1 - 5, May 2010.

## 저자 소개

### 이 민 정(준회원)



- 2014년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2014년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전자공학과 석사 과정  
 <주관심분야 : 가시광 통신, Cognitive Radio, 전력선 통신>

### 이 병 진(준회원)



- 2013년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2013년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전자공학과 석박사 통합과정  
 <주관심분야 : 가시광 통신, Cognitive Radio, 전력선 통신>

### 주 상 임(준회원)



- 2014년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2014년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전자공학과 석사 과정  
 <주관심분야 : 가시광 통신, Cognitive Radio, 전력선 통신>

### 김 용 원(준회원)



- 2004년 4월 ~ 2007년 5월 : 한국전자통신연구원 초고주파소자팀 연구원
- 2009년 7월 ~ 현재 : 충청지역사업평가관리원 New IT선도산업실 선임연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전자통신공학과 대학원(박사 과정)  
 <주관심분야 : 가시광 통신, Cognitive Radio, 전력선 통신>

### 김 경 석(정회원)



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