

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.3.1>

JIIBC 2013-3-1

# 다양한 간섭환경에서 MIMO기반 VLC 시스템의 성능 분석

## Performance Analysis of the Visible Light Communication System based on MIMO under Various Interference environments

이병진\*, 김용원\*\*, 김경석\*\*\*

Byung-Jin Lee, Yong-Won Kim, Kyung-Seok Kim

**요 약** 다양한 간섭환경에서 MIMO 기반 가시광 무선 통신 시스템의 성능 분석을 위해서 LED 패널을 고정하고, PD를 가진 단말기를 움직여 모의실험을 수행하였으며 MIMO 기술을 기반으로 하여 외부광에 의한 간섭이 통신 채널 품질 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 채널에서의 전송시간 지연에 의한 왜곡은 등화기를 사용하여 보상해 주어야 하며, 특히 데이터 전송 속도가 고속이 될수록 등화기의 사용이 절대적으로 필요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 VLC 시스템의 변조방식에 따라 채널 등화를 이용한 BER성능을 분석하였다.

**Abstract** we perform simulation. It is that LED panels is fixed and moving the terminal with PD in order to analyze the performance of visible-light wireless communication system based on MIMO under variety of the interference environment. And, based on the technology MIMO, we analyzed whether the interference caused by external light to give what effect changes in the quality of the communication channel. The distortion due to time delay in channel transmission must be compensated by using the equalizer. Especially, use of equalizer is need absolutely as data rate becomes high speed. Therefore, in this paper, the system VLC, were analyzed BER performance using channel equalization.

**Key Words** : Visible light communication, MIMO, Zero-forcing (ZF), Minimum mean square error (MMSE)

### 1. 서 론

최근 점진적으로 실내 및 차량 관련 각종 기존 아날로그 조명이 친환경적이고 디지털화에 용이한 LED조명으로 대체되어가고 있다. 일반 조명 분야는 각국 정부 주도에 산업계가 참여하고 있으며, 자동차 램프 쪽은 산업계 주도로 진행되어, 환경규제 등을 감안하면 몇 년 후에는 LED 조명 인프라가 전방위적으로 구축될 것으

로 예상된다<sup>[1]</sup>. 가시광 무선통신은 전송하고자 하는 데이터를 0과 1의 조합으로 변환해서 송신하는 점에서는 일반적인 무선 디지털 통신과 같은 방식을 적용하고 있다. 하지만 다른 점은 기존의 무선 통신은 전송에 따른 매질이 RF라 한다면 가시광 무선통신은 빛을 이용하기 때문에 0과 1을 빛의 점멸이나 명암으로 치환해서 송수신한다는 것이다. 특히, 이 점멸이나 명암의 변화 주기가 짧을수록 고속의 데이터를 전송할 수 있다<sup>[2]</sup>.

\*준회원 충북대학교 전자통신공학과

\*\*준회원 충청지역사업평가원

\*\*\*정회원 충북대학교 정보통신공학과 (교신저자)

접수일자 : 2013년 2월 15일, 수정완료 : 2013년 4월 29일

게재확정일자 : 2013년 6월 14일

Received: 15 February 2013 / Revised: 29 April 2013 /

Accepted: 14 June 2013

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

School of Information & Communication Engineering, Chungbuk University, Korea

가시광 무선통신의 특징은 주파수 할당의 문제가 없으므로 호환성이 좋고 가시광선은 벽을 통과하지 못하므로 벽과 같이 막혀있는 공간에서 다른 사용자의 신호를 도청하기 어려워 보안성이 좋다. 그리고 가시광선의 주파수를 재사용할 수 있다는 장점이 있으며, 가시광 영역의 조명 기기를 사용하기 때문에 다양한 응용 서비스 분야에 접목이 가능하다.

가시광 무선 통신을 활용하여 다양한 응용 서비스를 제공하기 위해서는 서비스 영역에서의 통신 신뢰성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 무선 통신 환경에서의 통신 신뢰성은 신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio ; SNR)로 표현되고, 수신기의 역할을 담당하는 PD (Photo Diode)가 수광할 수 있는 광도 (Light Intensity)에 따라 결정된다. 하지만 PD는 단순히 송수신기 사이의 거리와 빛이 들어오는 입사각도에 따라 광도가 결정되기 때문에 송신기의 역할을 하는 LED의 개수, 파워, 조사각 등이 통신 영역의 SNR을 결정하는 중요한 요소라 할 수 있다. 또한 통신 환경에서는 태양광, 형광등 같은 다른 광원이 존재하며, 이러한 외부 광에 의해서도 SNR에 영향을 미친다. 이에 본 논문에서는 실내 환경에서 MIMO를 기반으로 하여 외부 광에 의한 간섭이 통신 채널 품질 변화에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 OPTICAL MIMO 채널 모델을 분석하고, 3장에서는 VLC 시스템에 적용된 다양한 간섭환경을 분석한다. 4장에서는 분석한 모델에 간섭환경을 적용해서 모의실험을 수행하였으며, 5장에서는 결론을 맺는다.

## II. OPTICAL MIMO 채널 모델

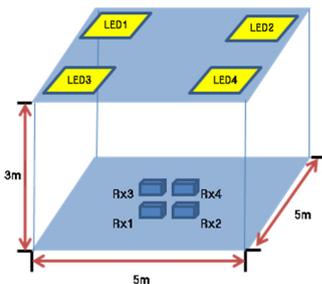


그림 1. 4x4 Optical MIMO 모델  
Fig. 1. 4x4 Optical MIMO model

그림 1은 4x4 MIMO 기반 무선 광 채널 모델이다. 4개의 송신 LED array는 동시에 독립적인 데이터 스트림을 전송하고 각각 방을 비추는데 사용된다. 4개의 수신 array는 각각 50cm 간격의 2x2배열 형태로 배치되어 있다. 방의 사이즈는 5x5x3m3로 고려하였다. LED array의 빛은 receiver의 모든 element에게 수신된다.

### 1. 송신기 모델

Lambertian 방사 특성을 가진 LED의 Angular distribution은 그림 2와 같이 나타난 것과 같으며 다음 식으로 나타낼 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$I(\phi) = P_t \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi) \quad (1)$$

여기서  $P_t$ 는 송신 파워이고,  $m$ 은 Lambertian emission,의 차수이다. 그리고  $\phi$ 는 LED의 방사각도이다. Lambertian의 차수가 작을수록 방사패턴은 넓게 퍼지고 차수가 클수록 빛이 집중적으로 모여서 방사됨을 볼 수 있다.

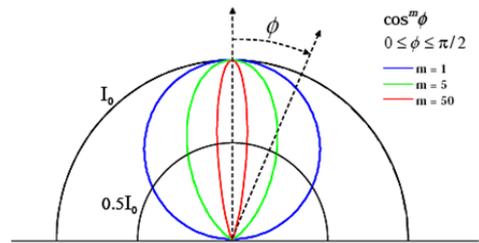


그림 2. Transmitter 분포  
Fig. 2. Transmitter distribution

### 2. VLC 채널 모델

본 논문에서는  $N_T$ 개의 송신기와  $N_R$ 개의 수신기가 있다고 가정한다.  $i$ 번째의 송신기와  $j$ 번째의 수신기의 DC gain은  $h_{ij}$ 로 표현할 수 있고, 그것은  $j$ 번째의 수신기에 도달하는  $i$ 번째 송신기의 모든 전력을 합산하여 추정할 수 있다.

$$h_{ij} = \begin{cases} \frac{A_{rx}^j}{d_{ij}^2} R_0(\phi_{ij}) \cos(\phi_{ij}), & 0 \leq \phi_{ij} \leq \phi_c \\ 0, & \phi_{ij} > \phi_c \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $A_{rx}^j$ 는 j번째 수신기의 수신범위이고  $d_{ij}$ 는 i번째 송신기와 j번째 수신기 사이의 거리이다.  $\phi_{ij}$ 는 방사각이고  $\psi_{ij}$ 는 수신기에서 빛의 입사각이다.  $\psi_c$ 는 수신기의 FOV(field of view) 이다(그림. 3).

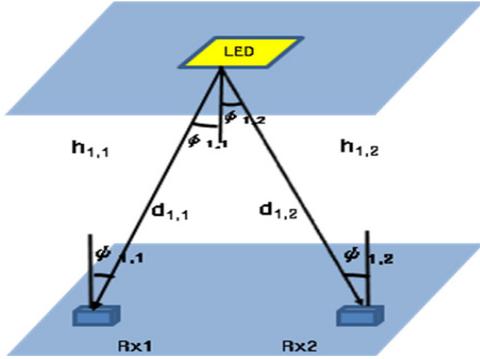


그림 3. LOS 채널 이득 계산에 사용되는 구조  
Fig. 3. Geometries used in LOS channel gain calculations

각 송신기와 수신기의 DC gain은 행렬H로 표현할 수 있다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{1j} & \cdots & h_{1N_T} \\ h_{i1} & h_{ij} & \cdots & h_{iN_T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_R1} & \cdots & \cdots & h_{N_R N_T} \end{bmatrix} \quad (3)$$

수신기에서, H의 역은 전송 신호의 추정치를 얻기 위해 사용할 수 있다.

### 3. 수신기 모델

수신기는 optical filter와detector, 그리고 preamplifier와 optical concentrator로 구성되어 있다. 빛이 통과될 때 optical filter와 optical concentrator를 거쳐 수신기에 도달한다. 수신된 파워는 다음과 같다.

$$P_{rx,j} = P_{LED} \sum_{i=1}^{N_i} h_{ij} t_i \times T_f(\psi) \times g(\psi) \quad (3)$$

여기서  $T_f(\psi)$ 는 gain of optical filter이고,  $g(\psi)$ 는 concentrator gain이다.

신호 대 잡음비(SNR)는 통신의 품질을 나타내고, 다음 식 (4)과 같다<sup>[4]</sup>.

$$SNR = \frac{(R P_{rx})^2}{\sigma_{total}^2} \quad (4)$$

여기서 R은 photodiode responsivity(A/W)이다. total noise variance  $\sigma_{total}^2$ 은 식(5)과 같다.

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{amplifier}^2 \quad (5)$$

shot noise variance  $\sigma_{total}^2$ 은 식(6)과 같다.

$$\sigma_{shot}^2 = 2qR(P_{rx} + P_n)B_n \quad (6)$$

여기서  $B_n$ 는 the noise-bandwidth이고  $P_n$ 는 외부광원의 파워이다. q는 electronic charge 이고  $B_n = I_2 R_b$ 이다.  $R_b$ 는 data rate,  $I_2$ 는 the noise-bandwidth factor이다<sup>[5]</sup>. Amplifier noise variance는 다음의 식 (7)과 같다.

$$\sigma_{amplifier}^2 = i_{amplifier}^2 B_a \quad (7)$$

여기서  $i_{amplifier}$ 는 amplifier noise current를 나타내고  $B_a$ 는 amplifier bandwidth이다.

그러므로 total noise variance는 다음의 식(8)으로 다시 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{total}^2 = 2qR(P_{rx} + P_n)B_n + i_{amplifier}^2 B_a \quad (8)$$

### 4. 성능 향상을 위한 채널 추정 알고리즘 적용

Zero-forcing과 Minimum Mean-Square-Error 알고리즘은 각 송신 안테나에서 전송된 신호를 검출하는 데 사용한다. 실내 광무선 채널이 라디오 무선 채널에 비해 매우 빠르게 변화하지 않기 때문에, 채널을 추정하는 것은 어렵지 않다.

#### 가. ZF(Zero-Forcing) 기법

수신신단의 채널 상태를 알고 있을 때, 이 채널정보의

역행렬을 이용하여 수신신호를 복호하는 방법이다. 이 방법은 연산 량이 간단한 반면에 BER(Bit error rate) 이 낮은 단점이 있다.

가중치 행렬 D는 다음 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$D = (HH^\dagger)^{-1}H^\dagger \quad (9)$$

여기서  $H^\dagger$  는 채널 H의 Hermitian matrix 이다.

#### 나. MMSE(Minimum Mean-Square-Error) 기법

ZF 검출 알고리즘은 잡음의 영향을 고려하지 않기 때문에 성능 면에서 단점을 가지고 있다. 그래서 잡음의 영향을 고려하여 송신 신호를 추정하기 위한 MMSE 검출 알고리즘이 대두하게 되었다. MMSE 알고리즘은 가중치 벡터  $G_{MMSE}$ 를 생성하여 mean square error 가 최소가 되는 값을 찾아내는 것이며 그 수식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$G_{MMSE} = \left( HH^H + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} I \right) H^H \quad (10)$$

여기서  $\sigma_s^2, \sigma_n^2$ 은 각각 송신 신호의 전력, 잡음의 전력을 나타내고, I는 단위행렬을 나타낸다.

MMSE 알고리즘은 낮은 SNR 에서는 작은 가중치를 곱하는 효과를 얻는다. 하지만 MMSE 검출 방식은 잡음의 영향을 고려하기 때문에 ZF 알고리즘 보다는 좋은 성능을 보이지만, 연산 량이 증가한다는 단점이 있다. 또한 높은 SNR에서는 ZF 알고리즘과 동일한 성능을 보임을 알 수 있다<sup>[6]</sup>.

### III. MIMO기반 VLC 시스템에 적용된 다양한 간섭환경

포토다이오드는 외부 광에 노출되어 있어서 input receiver amplifier에 추가적인 노이즈가 발생할 수 있다. 가장 일반적으로 발생하는 외부 광의 종류는 daylight, fluorescent lamps, sun등이 있다. 이것들의 상대적인 Photocurrent density 는 그림 4에 나타낸 것과 같다<sup>[7]</sup>.

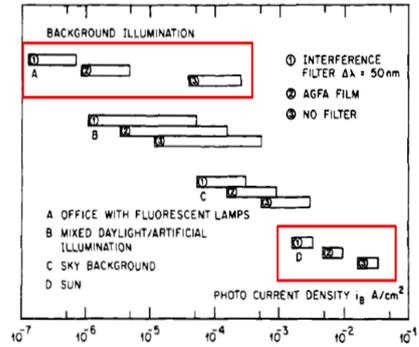


그림 4. 간섭 환경의 Photocurrent 밀도  
Fig. 4. Photocurrent density of interference environment

외부 광의 레벨은 신뢰할 수 있는 전송을 하기 위해 필요한 광 신호의 파워에 영향을 미친다. 본 논문은 두 가지의 간섭 환경을 고려하였다. Fluorescent light 환경은 창문이 없는 방 안에서 Fluorescent light를 측정 한 값이고 sun은 직사광선에 노출시켜 측정 한 값이다. 본 논문에 적용한 각 환경에 따른 Photocurrent density값은 표 2에 있는 값과 같다.

표 2. 간섭 환경의 시뮬레이션 세팅 값  
Table 2. Simulation setting of interference environment

Ambient environment	Photocurrent density(A/cm <sup>2</sup> )
Sun	5x10 <sup>-2</sup>
Fluorescent light	5.8x10 <sup>-6</sup>

## IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 1. Optical MIMO 채널의 SNR 성능 분석

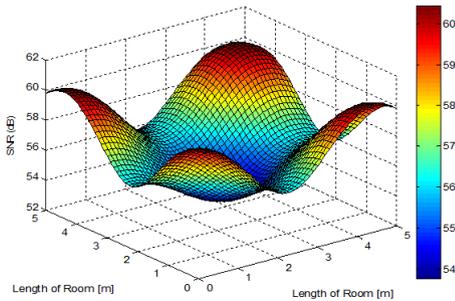
외부 광 잡음이 SNR 성능에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 모의 실험결과를 확인하였다. 4x4의 다중 입출력 무선 광 채널환경을 가정하였고, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 3과 같다.

표 3. 4x4 MIMO 채널 파라미터  
Table 3. 4x4 MIMO channel parameter

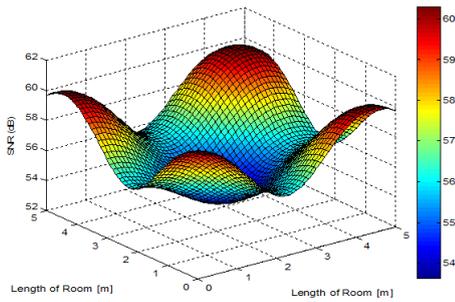
ROOM size		5x5x3m
PLED		2w
LED Location	LED 1	[ 0.4m 4.6m 3m ]
	LED 2	[ 4.6m 4.6m 3m ]
	LED 3	[ 0.4m 0.4m 3m ]
	LED 4	[ 4.6m 0.4m 3m ]

Lamb. order (m)	1
Distance of each receiver	50cm
PD area (Arx)	1cm <sup>2</sup>
Distance (R)	3m
FOV at the receiver	90 deg
Gain of optical filter	1
Optical concentrator	1.5
Photodiode responsivity (R)	0.4 (A/W)
Amplifier bandwidth (Ba)	50 MHz
Amplifier noise current (iamplifier)	$5\text{pA} / \sqrt{\text{Hz}}$
Noise power of ambient light (Pn)	0
Noise bandwidth factor (I2)	0.562

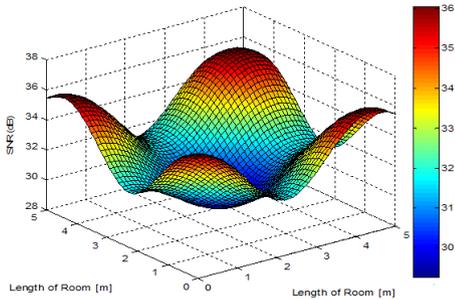
위의 파라미터를 적용해서 나타낸 SNR 성능은 다음 그림 5와 같다.



(a) Ambient light = 0



(b) fluorescent light



(c) sun

그림 5. 간섭 환경의 SNR 성능 비교  
Fig. 5. SNR performance comparison of interference environment

그림 5는 4x4 MIMO기반으로 한 VLC 채널에 각각의 간섭 환경을 적용한 결과이다. m의 값은 1이다. m값이 1일 때, 빛이 넓게 퍼지므로 LED가 위치하지 않은 방 중심에도 영향을 미친다. ambient light가 적용되지 않았을 때의 최대 SNR은 60.42dB이며 fluorescent light는 60.28dB, sun은 36dB이다. LED의 파워가 2W이기 때문에 상대적으로 잡음의 크기가 작은 fluorescent light는 외부 광을 적용하지 않는 값과 거의 차이가 나지 않는다. 반면에 sun은 ambient light를 적용하지 않는 값과 비교해보면 각각 약 24dB 차이가 나며, 외부 광 잡음에 의한 성능의 감쇄가 sun 환경일 때 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다

## 2. BER performance 분석

성능 분석에 사용된 변조방식은 NRZ-OOK과 V-PPM이며, 우선 임의의 데이터를 생성한 후에 채널 H값을 적용한 뒤에 AWGN을 추가한다. 성능을 보정하기 위해서 ZF, MMSE Equalizer를 적용한 뒤, 임계값을 적용해서 데이터를 복조한다. 그 후 기준에 생성된 신호와 복조된 신호를 비교하여 BER를 계산한다. 결과 그래프는 다음 그림과 같다.

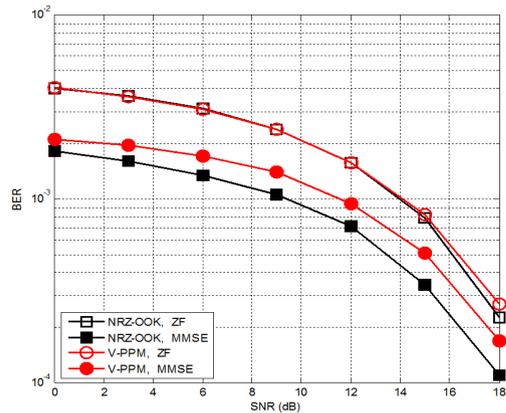


그림 6. 2x2 MIMO 기반 BER 성능 비교  
Fig. 6. BER performance comparison based on MIMO

그림 6은 2x2 MIMO를 대상으로 변조방식과 Equalizer에 따라서 BER 성능을 비교 하였다. 그래프에서 V-PPM와 NRZ-OOK를 비교해 보면 V-PPM보다 NRZ-OOK가 좋은 성능을 보인다. 그리고 두 변조방식 모두 MMSE 알고리즘이 ZF 알고리즘에 비해 성능이 좋

게 나옴을 볼 수 있다. V-PPM이 잡음의 영향을 NRZ-OOK보다 더 받음으로 인해서 잡음의 영향을 고려한 MMSE 검출 방식에서 성능의 차이를 볼 수 있다. 따라서 BER 성능과 연산량을 고려해서 변조와 MIMO 방식을 선택을 함과 동시에 equalizer를 적용해 채널 보정을 해줘야 성능이 나올 수 있음을 알 수 있다.

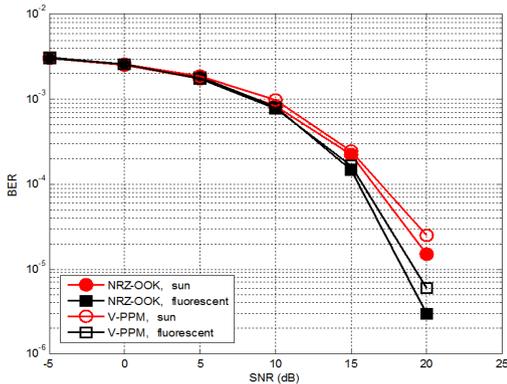


그림 7. 변조방식에 따른 간섭환경의 BER 성능 비교  
Fig. 7. According to the modulation, BER performance comparison of interference environment

그림 7은 4x4 MIMO를 기반으로 두 가지의 변조방식을 각각 외부 광 환경에 적용시켜 BER 성능을 나타냈으며 모두 ZF equalizer를 적용하였다. LED의 파워는 1W를 적용하였으며, 위의 그래프에서 살펴보면 원 그래프는 sun환경을 나타내고 사각 그래프는 fluorescent환경을 나타낸다. 두 변조방식 모두 다른 환경에 비해 상대적으로 잡음의 세기가 강한 sun이 가장 낮은 성능을 보이며, 두 가지 잡음 환경 모두 NRZ-OOK방식이 성능이 높게 나왔다. 이는 NRZ-OOK 보다 V-PPM이 잡음의 영향을 더 받음을 알 수 있다. 그림 8은 4x4 MIMO기반으로 LED 파워에 따라서 sun과 fluorescent light 두 가지 환경을 비교해 보았으며 각각 ZF equalizer를 적용하였다. 1W일 때와 비교해서 200mW일 때, 잡음의 영향이 크게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 LED의 파워가 외부 광의 파워와 상대적으로 크게 차이가 나지 않기 때문에 간섭이 크게 작용함을 볼 수 있다. 이처럼 각각 외부 광 잡음을 적용하였을 때 LED의 파워에 따라서 성능의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 때문에 각 환경에 맞추어 LED의 파워를 고려하여야 할 것이다.

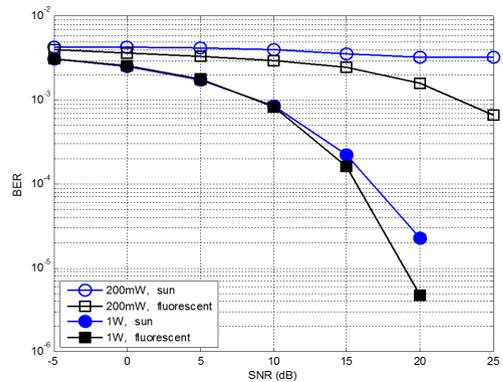


그림 8. LED 파워에 따른 간섭환경의 BER 성능 비교  
Fig. 8. According to the LED power, BER performance comparison of interference environment

## V. 결론

가시광 무선 통신 시스템은 LED와 빛의 ON/OFF를 인지할 수 있는 PD를 이용한 새로운 무선 통신 기술이다. 이와 같은 가시광 무선 통신 시스템의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 LED 조명과 단말기 간의 통신 채널 품질의 변화를 정확히 분석하는 것이 중요하다.

이에 본 논문에서는 MIMO 기반 가시광 무선통신을 위한 채널 모델링을 주제로 특정 조건에서의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 가시광 무선통신의 광 채널에 대한 성능을 살펴보았다. 또한 통신 측면에서 가시광 무선통신에 적용될 수 있는 다양한 외부 광 잡음에 대하여 어떤 영향을 미치는지를 시뮬레이션 하였다. 그 결과 가장 간섭의 세기가 큰 sun환경이 통신 채널 품질에 가장 큰 영향을 끼침을 확인하였으며 LED 파워가 낮으면 상대적으로 외부 광에 의한 잡음이 더 크게 영향을 미쳐 성능 하락에서 영향을 줄을 보였다. 이와 같은 연구 결과는 가시광 무선 통신 시스템의 상용화 구축 단계에서 통신 영역의 규모에 따라 신뢰적인 통신 채널 제공을 위해 외부 잡음 환경을 고려하여 LED의 위치나 파워를 결정할 수 있는 기술로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

[1] E. T. Won and et. al., "Visible light communication

- : tutorial," IEEE 802.15- <08/0114-02>, March 2008.
- [2] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama and M.Nakagawa, "Indoor Visible Light Data Transmission System Utilizing White LED Lights," IEICE Trans. Communication, E86-B, pp.2440-2454, 2003.
- [3] Tarik Borogovac, Michael Rahaim and Jeffrey B. Carruthers, "Spotlighting for Visible Light Communications and Illumination", Proceedings of the First IEEE Workshop on Optical Wireless Communications. GLOBECOM, 2010.
- [4] L. Zeng, D. C. O'Brien, H. Le-Minh, K. Lee, D. Jung and Y. Oh, "Improvement of Data Rate by Using Equalization in an Indoor VLC System", IEEE ICCSC 2008, Shanghai, China, May 2008.
- [5] S.B.Alexander, Optical Communication Receiver Design, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Wash, 1997.
- [6] Wolniansky, P.W., Foschini, G.J., Golden, G.D., Valenzuela, R.A., "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel" 1998 URSI International Symposium, Signals, Systems, and Electronics, 1998. (ISSSE '98), Oct., 1998, pp.295-300
- [7] F.R. Gfeller and U.H. Bapst "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation", Proc. IEE, vol. 67, no. 11, pp. 1474-1486, 1979.

※ 이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 저자 소개

### 이 병 진(준회원)



- 2013년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
  - 2013년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전파공학과 석박사 통합과정
- <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 전파통신공학과 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 : 전파감시/관리시스템, 전파신호처리, SDR, Cognitive Radio, MIMO-OFDM, 전력선통신, 디지털라디오, MIMO 무선채널분석>