

LED기반 실내 조명 구조에 따른 무선통신 채널의 품질 분석

최수일*

Quality Analysis of Wireless Communication Channel Based on the Shapes of LED-Based Interior Lighting

Su-il Choi*

요 약

가시광 통신은 반도체 LED를 이용하여 정보를 브로드캐스트 하며, 백색광 LED는 조명과 광무선 통신을 하나의 광원을 사용하여 제공할 수 있다. 본 논문에서는 단일칩 백색광 LED를 활용하여 조명과 통신에 적합한 조명 기구를 제안한다. 백색광 LED 조명기구의 구조에 따른 수평 조도특성, 무선채널 대역특성, 심볼간 간섭현상, 신호대 잡음비 및 비트 에러율을 분석함으로써 장애물이 있는 경우 제안한 LED 조명이 기존의 조명보다 우수한 조명 및 통신 채널을 제공할 수 있음을 보이고자 한다.

Key Words : optical wireless, visible light communication, white-light LED.

ABSTRACT

Visible light communications (VLC) uses modern solid-state LEDs to broadcast information. Emerging white-light LEDs allows the combination of lighting and optical wireless communication in one optical source. In this paper, a new LED lighting using one-chip-type white LED is proposed for efficient illumination and optical wireless communications. Performance analysis such as horizontal illuminance, 3-dB cut-off frequency, inter-symbol interference, signal-to-noise ratio and bit-error rate shows the effects of the shapes of LED lighting. Performance of the proposed LED lighting under the existence of obstacles is superior to that of the existing LED lighting in illumination and optical wireless communication.

I. 서 론

광무선 통신은 근거리 고속 무선통신을 제공할 수 있으므로 무선랜(WLAN)과 블루투스 같은 기존의 RF 기반 통신기술의 보완적인 통신기술이다. 더불어, 광무선 통신은 광대역 및 비인가 대역을 제공하므로 기존의 라디오 대역과 간섭을 일으키지 않는다. 그러므로 광무선 통신은 RF 신호에 예민한 환경에서 매우 유용한 통신을 제공할 수 있다. 특히, 가시광을 이용

하는 경우 조명과 통신기능을 동시에 제공할 수 있는 장점이 있다.

기존의 조명기구와 비교하면 반도체 기반 백색 LED는 저전력, 고휘도, 긴수명 등의 장점이 있어 차세대 조명기구로 각광받고 있다. 백색 LED는 적색, 녹색 및 청색 LED를 결합한 멀티칩 LED와 청색 LED에 형광물질을 도포한 단일칩 백색 LED로 구분된다. 경제적 측면에서 단일칩 백색 LED가 선호되며, 고효율 백색 LED를 이용하는 경우 조명기능과 더불어

* 주저자 : 전남대학교 전자컴퓨터공학부 광통신 연구실, sichoi@chonnam.ac.kr, 정회원
논문번호 : KICS2012-04-204, 접수일자 : 2012년 4월 16일, 최종논문접수일자 : 2012년 7월 2일

어 통신기능에 고려할만한 변조 대역(~2-20 MHz)을 제공할 수 있다¹⁻³⁾.

LED 기반 조명 기능과 통신 기능의 융합은 새로운 응용 서비스를 제공할 수 있다. 융합 기능의 원리는 LED의 빠른 스위칭과 광무선 공간에서 가시광 변조 기능에 기반하고 있다. LED 기반 통신 서비스 제공을 위하여 가시광 무선통신 기술 표준화가 IEEE 802.15.7에서 진행되었으며⁴⁾, 유럽에서는 OMEGA 프로젝트를 통해서 광무선 홈네트워크 표준을 진행하였다⁵⁾.

LED 기반 조명과 통신의 융합은 수평 조도 (Horizontal Illuminance), 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR), 무선 채널 대역(3-dB Cut-off Frequency), 심볼간 간섭효과(Inter Symbol Interference, ISI) 및 변조방식에 따른 비트 에러율(Bit-error rate)에 대한 해석을 필요로 한다. 본 논문에서는 단일칩 백색 LED를 이용한 조명기구의 구조 및 전기채널의 경로차이에 따른 수평 조도 특성, 신호대 잡음비, 광무선 통신 대역 특성, 심볼간 간섭효과 및 비트 에러율을 분석함으로써 조명기구의 구조에 따른 영향을 비교코자 한다. 특히, 장애물이 있는 경우 직접광(Line of Sight, LOS) 채널의 대역 및 SNR에 미치는 영향을 줄일 수 있는 조명 기구를 제안코자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 백색 LED의 조명특성을 알아보고 조명과 통신에 적합한 LED 조명구조를 제안한다. 더불어, 제안한 LED 조명 등의 조명 특성을 기존의 조명 구조와 비교코자 한다. III장에서는 백색 LED의 구조에 따른 통신채널 특성을 알아보고, 장애물과 심볼간 간섭현상(ISI)에 의한 통신 채널의 영향을 비교함으로써 제안한 조명구조가 기존의 조명구조보다 장애물의 영향에 강함을 보이고

자 하며, IV장에서는 결론을 맺는다.

II. 백색 LED를 이용한 조명

실내 조명을 위해서는 일정한 밝기 이상의 조명이 필요하며, 신뢰할 수 있는 고속의 데이터 통신을 위해서는 충분한 출력 광파워가 제공되어야 한다. LED 조명의 설계를 위해서는 광속(luminous flux), 출력 광파워(transmitted optical power), 수평 조도(horizontal illuminance)와 같은 기본적인 특성을 고려해야한다.

광속은 사람의 눈이 감지할 수 있는 광원의 광파워를 의미한다. 방사 스펙트럼으로부터 광속 Φ [lm]은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi = K_m \int_{380}^{720} p(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

여기에서 $V(\lambda)$ 는 표준 광곡선을 나타내며, K_m 은 최대 밝기 값으로써 $\lambda=555\text{nm}$ 에서 683 lm/W 이다. 출력 광파워 $P[\text{W}]$ 는 다음과 같다.

$$P = \int_{\Lambda_{\min}}^{\Lambda_{\max}} p(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

여기에서 Λ_{\min} 과 Λ_{\max} 은 포토 다이오드의 감도 곡선에 의해 결정된다. 청색 LED에 형광물질을 도포한 백색 LED의 경우 광속과 출력 광파워는 4.2 mW/lm 의 관계를 가지고 있다.

조도(illuminance)는 조명이 비추는 표면의 밝기를 가리킨다. 람베르시안 방사 특성을 가지고 있는 LED의 경우 수평 조도는 다음과 같다.

$$E_h = I_0 \cos^m(\theta) \cos(\phi) / r^2 \quad (3)$$

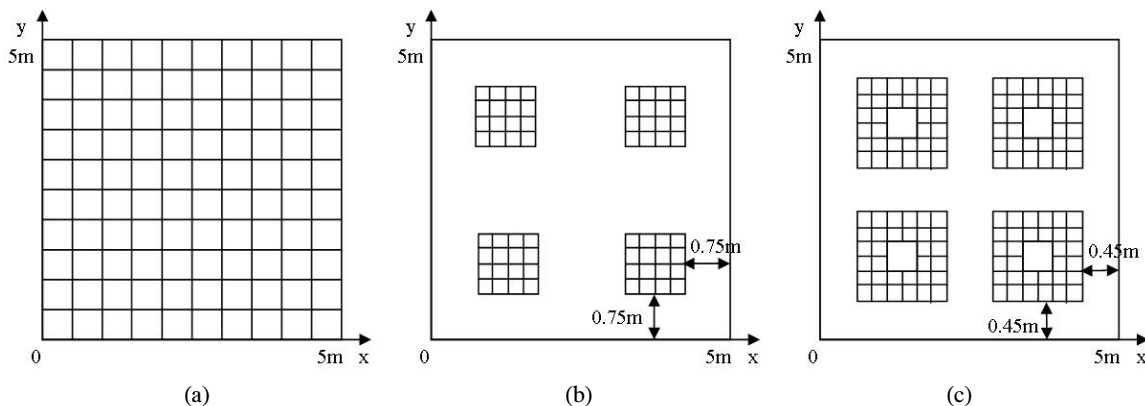


그림 1. LED 조명등 구조의 종류: (a) 유형 A, (b) 유형 B, (c) 유형 C.
Fig. 1. Layout of ceiling lighting design: (a) type A, (b) type B, (c) type C.

여기에서 $I_0 = I(\theta = 0) = (m + 1)\Phi / (2\pi)$ 는 최대 광도(luminous intensity)이고, θ 는 방사각도, ϕ 는 수신각도, r 은 LED와 수신기 표면과의 거리, m 은 램베르시안 출력의 차수이며 광원의 방사 반각 θ_{max} 에 의해 결정된다.

$$m = -1 / \log_2(\cos\theta_{max}) \quad (4)$$

2.1. 통신을 위한 LED 조명 기구의 설계

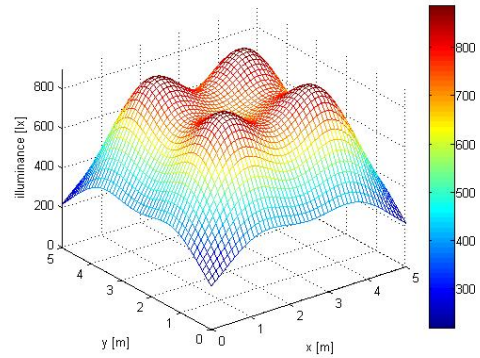
우선 조명실험을 위해 $5 \times 5 \times 3\text{m}^3$ 에 해당하는 동일한 실내 구조를 고려하였으며, LED조명은 바닥으로부터 2.5m 높이에 설치되어 있고, 책상의 높이는 0.85m이다^[3]. 시스템의 성능은 책상 높이에서 평가하며, EN12464-1 기준에 의하면 책상 높이에서 제공할 최소 밝기는 400 lx로 정하고, 200 ~ 800 lx에 해당하는 조도가 실내에 분포하도록 설계한다^[6]. 그러므로, LED 조명 기구는 실내 공간에서 400 lx 이상의 조도가 제공되는 영역을 최대화하도록 설계되어야 한다.

LED 조명기구의 구조는 VLC 통신채널의 성능비교를 위해서 그림 1과 같이 세 가지 유형의 LED 조명등을 고려하였다. 유형 A는 균일한 조도를 제공하는 반면 동일한 밝기 제공에 필요한 LED 칩을 상대적으로 많이 필요하고, 심볼간 간섭현상(ISI)에 취약하다는 점 때문에 통신채널 제공에는 적합하지 않다^[7]. 유형 B는 조명 및 통신채널 성능 시험에 사용되는 일반적인 LED 유형이며^[3,7], 유형 C는 장애물이 있더라도 직접광의 분포 및 통신채널의 성능 저하에 강한 특성을 제공하기 위하여 제한한 구조이다. 표 1은 LED 유형 B와 유형 C에 대해 조명 및 통신채널 성능 평가에 필요한 시뮬레이션 변수를 나타낸다.

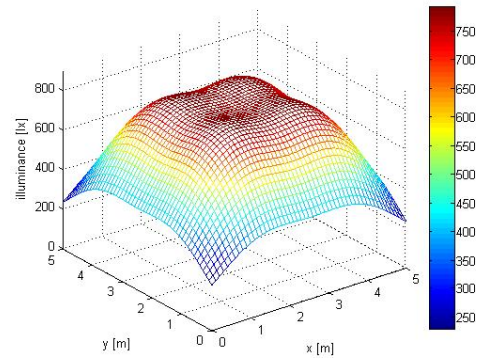
표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Parameter	유형 B	유형 C
Transmitted optical power, P_{CHIP}	63 mW	
Semi-angle at half power, θ_{max}	60°	
Maximum luminous intensity, I_0	9.5 cd	
Number of LED chips	900	832
LED chip spacing	0.07 m	0.1 m
Obstacle size	$0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$	

그림 2는 유형 B와 유형 C에 대해서 책상 위에서



(a)

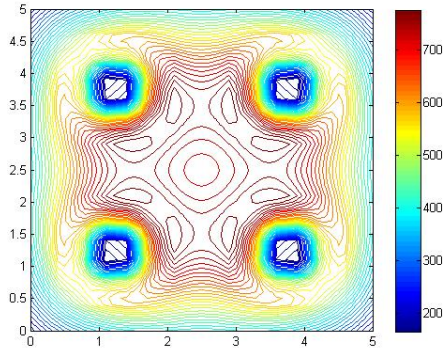


(b)

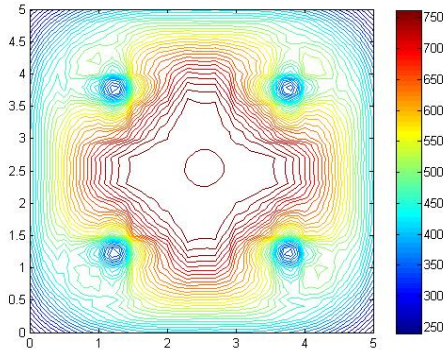
그림 2. 책상위에서 측정된 수평 조도의 분포: (a) 유형 B, (b) 유형 C.
Fig. 2. Distribution of horizontal brightness at the desktop surface: (a) type B, (b) type C.

측정한 LED 조명등의 수평 조도 분포를 보여준다. 두 가지 유형의 조명 모두 대부분의 영역에서 400 lx 이상의 밝기를 제공하고 있지만, 유형 B의 경우 조도의 분포가 균일하지 않고 400 lx 이상의 조도 영역이 90.6%에 해당하며 평균 조도는 634 lx에 해당한다. 유형 C의 경우 상대적으로 적은 LED 칩으로 균일한 조명을 제공하면서 최소 밝기를 만족하는 영역이 91.9%에 해당하며 평균 조도는 609 lx에 해당한다. 유형 C의 평균 조도가 유형 B보다 적게 나온 것은 조명에 사용된 LED 칩의 개수에 의한 결과이다.

그림 3은 장애물이 있는 경우 수평 조도의 분포를 보여준다. 장애물은 $0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$ 의 사각형 장애물이 1.5 m의 높이에 위치하며 각각의 LED 조명등 바로 밑에 위치하는 상황에서 수평 조도의 분포를 구하였다. 유형 B는 평균 조도 551 lx를 제공하고 81.5%의 영역에서 400 lx 이상의 조도를 제공하며 각각의 LED 조명등 아래에서 조명의 밝기가 급격히 줄어듦을 알 수 있다. 유형 C의 경우 평균 조도 555 lx를 제공하고 88.8%의 영역에서 400 lx 이상의 조도를 제공



(a)



(b)

그림 3. 장애물이 있는 경우 수평 조도의 분포: (a) 유형 B, (b) 유형 C.
Fig. 3. Contour distribution of horizontal brightness under obstacles: (a) type B, (b) type C.

하며 장애물 아래에서도 조명의 밝기가 완만하게 감소함을 알 수 있다. 특히 유형 B의 경우 조명 바로 밑에서 최소 밝기가 148.7 lx를 보여 통신 품질에 심각한 영향을 예상할 수 있다.

III. 백색 LED를 이용한 통신 채널 해석

광무선 채널의 모델은 송신 전력과 수신 전류에 의해 다음과 같다.

$$i(t) = \gamma P(t) \otimes h(t) + n(t) \quad (5)$$

여기에서 $i(t)$ 는 수신 전류, γ 은 광검출기의 반응도, $P(t)$ 는 송신 광신호, $h(t)$ 는 임펄스 응답, $n(t)$ 는 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN), 그리고 \otimes 는 컨버루션을 나타낸다.

평면위의 조도는 직접광(LOS)과 벽면에서 반사된 반사광에 의해 정해진다. 직접광은 디락 델타 함수로 모델링 되고, 확산광은 적분구(integrating sphere) 모

델로 표현될 수 있다⁸⁾. 광무선 채널의 주파수 응답은 다음과 같다.

$$H(\omega) = \sum_{i=1}^N \eta_{LOS,i} e^{-j\omega \Delta\tau_{LOS,i}} + \frac{\eta_{DIFF}}{1 + j\omega/\omega_0} e^{-j\omega \Delta\tau_{DIFF}} \quad (6)$$

여기에서 η_{LOS} 와 η_{DIFF} 는 직접광과 확산광 신호의 채널 이득을 나타내고, $\Delta\tau_{LOS}$ 와 $\Delta\tau_{DIFF}$ 는 직접광과 확산광의 신호 지연값, f_0 는 확산 채널의 3-dB 컷 오프 주파수를 나타내며 중간 크기의 방에서 대략 10 MHz에 해당된다⁸⁾.

직접광 신호의 채널 이득을 위해 i 번째 LED칩에 의한 직접광 이득을 구하면 다음과 같다.

$$\eta_{LOS,i} = \frac{(m+1)A_R}{2\pi r_i^2} \cos^m(\theta_i) \cos(\phi_i) \text{rect}(\phi_i/\theta_{\max}) \quad (7)$$

그리고

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } |x| \leq 1 \\ 0 & \text{for } |x| > 1 \end{cases} \quad (8)$$

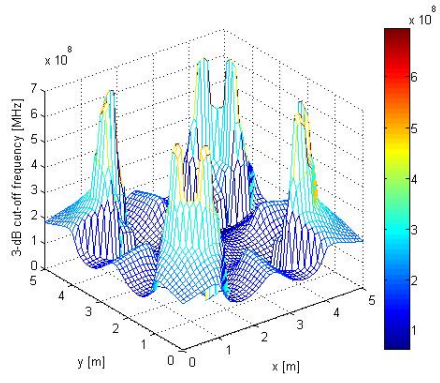
여기에서 A_R 은 수신기의 유효 표면적, ϕ_{\max} 은 수신기의 시야각을 나타낸다. 더불어, 표면적이 1 cm²인 실리콘 PIN 포토다이오드와 이득이 3인 집광기, 그리고 청색 필터를 결합하여 유효 표면적이 3 cm²인 광검출기를 고려한다^{3,7)}.

확산광 신호의 채널 이득은 실내의 어느 곳에서도 일정하며 A_R 의 값과 실내 구조의 특성에 의해서 다음과 같이 결정된다.

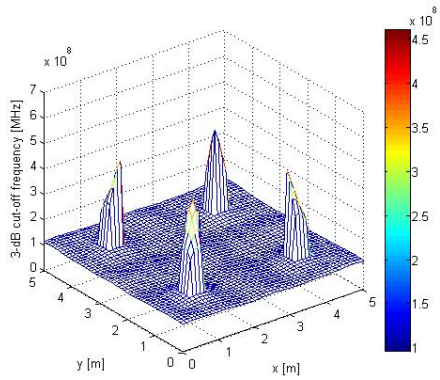
$$\eta_{DIFF} = \frac{A_R}{A_{\text{room}}} \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (9)$$

여기에서 A_{room} 은 실내 면적, ρ 는 평균 반사도를 나타낸다⁸⁾. 직접광에 비해 확산광은 무선 채널의 대역에 큰 영향을 미치지 못한다. 조명과 통신을 동시에 구현코자 하는 경우 장애물에 의한 채널 대역 분포 및 신호대 잡음비 분포등 통신 성능의 영향을 분석해야 한다.

그림 4는 장애물이 있는 경우 LED 조명의 구조별 3-dB 컷오프 주파수 분포를 보여준다. 두 가지 LED



(a)



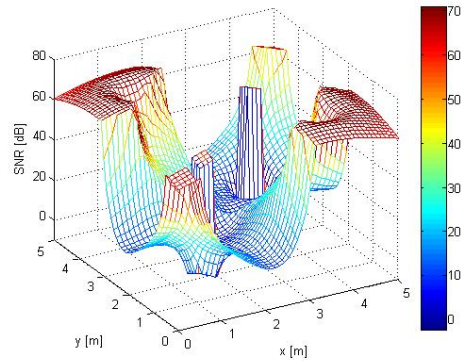
(b)

그림 4. 장애물이 있는 경우 채널 대역 분포: (a) 유형 B, (b) 유형 C.
Fig. 4. 3-dB cut-off frequency distribution under obstacles: (a) type B, (b) type C.

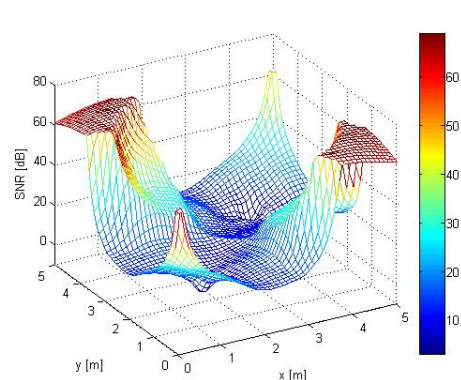
조명에 대해 유효 대역은 LED의 최대 변조 대역인 20 MHz 보다 훨씬 큰 값으로 분포한다. 유형 B의 경우 장애물 아래에서 3-dB 컷오프 주파수의 최소값은 61.5 MHz를 갖게되고, 유형 C의 경우 3-dB 컷오프 주파수의 최소값은 96.7 MHz를 갖는다. 두 가지 유형 모두 광송신기의 변조 주파수보다 훨씬 큰 광무선 채널 대역을 가지므로 채널의 영향이 없다고 볼 수 있지만, 유형 B의 경우 장애물에 의한 채널 대역의 변화가 크게 나타남을 확인할 수 있다.

3.1. SNR 성능과 심볼간 간섭현상

심볼간 간섭(ISI)은 출력 신호의 전송이 여러 개의 경로로 인해 생기며, 광무선 신호의 전송 속도를 제한한다. 전송된 개별 심볼에 대해 신호의 첫 수신 이후 심볼 주기 T_{sym} 의 1/2보다 늦게 도착한 신호의 경우 심볼간 간섭을 일으킨다⁷⁾. 그러므로, 수신 광신호의 파워 $P_{R,sig}$ 와 심볼간 간섭에 의한 수신 광잡음의 파워 $P_{R,ISI}$ 는 다음과 같다.



(a)



(b)

그림 5. 장애물과 전기채널의 경로 차이가 있는 경우 SNR 분포: (a) 유형 B, (b) 유형 C.
Fig. 5. Distribution of SNR on the working plane under obstacles and bad cabling: (a) type B, (b) type C.

$$P_{R,sig} = \sum_{i=1}^N P_R(t_i \leq T_{sym}/2) \quad (10)$$

$$P_{R,ISI} = \sum_{i=1}^N P_R(t_i > T_{sym}/2) \quad (11)$$

신호대 잡음비(SNR)는 통신의 품질을 나타내는 방법이므로 심볼간 간섭현상(ISI)을 고려한 경우 신호대 잡음비는 다음과 같다.

$$SNR_0 = 2\gamma^2 P_{R,sig}^2 / (N_0 B + \gamma^2 P_{R,ISI}^2) \quad (12)$$

여기에서 N_0 은 잡음의 파워 스펙트럼 밀도 [A^2/Hz], 대역 B 는 20 MHz, 실리콘 기반의 포토다이오드의 응답도 γ 는 청색영역에서 대략 0.28 A/W이다. 잡음의 전력밀도함수 N_0 는 산탄잡음(shot noise)과 열잡음(thermal noise)에 의해 결정된다³⁾. 여기에서 산탄잡음의 영향이 열잡음의 영향보다 훨씬 크다고 가정하며, 이 경우 햇빛의 영향에 의해 잡음의 파워 스펙트럼 밀도는 다음과 같다⁷⁾.

$$N_0 \approx N_{shot} \approx 10^{-22} A^2/Hz \quad (13)$$

LED 조명별 전기채널 경로차이 및 광채널 경로의 차이가 클수록 신호대 잡음비 SNR_0 값은 줄어들게 되고 전송 속도를 제한하게 된다. 그림 5는 장애물과 전기 채널의 경로 차이에 의한 신호대 잡음비(SNR)의 영향을 보여준다. 4개의 장애물은 각각의 LED 조명 등 밑에 위치하고 조명등 중에서 대각선에 위치하는 2개의 LED 조명등에 대해서 전기 채널의 길이를 2.5 m 더 길게 연결한 후 신호대 잡음비 분포를 구하였다. 이는 LED 조명등에 연결된 전기 채널의 길이가 일정치 않는 경우 ISI 영향을 크게 받게 되므로 전기 채널과 광무선 채널을 고려한 SNR 분포를 확인코자 하였다. 유형 B의 경우 전기 채널 길이 차이에 의한 심볼간 간섭현상에 의해서 전체적으로 SNR 분포가 급격히 변함을 알 수 있으며, 장애물에 의한 SNR 감소에 의해서 장애물 아래에서 -2.40 dB에 해당하는 SNR 최소값을 갖고, 평균 33.95 dB에 해당하는 SNR값을 갖는다. 유형 C의 경우에도 전기 채널 길이 차이에 의한 심볼간 간섭현상과 장애물에 의한 SNR 손실 특성이 존재함을 확인할 수 있으며, 장애물 아래에서 3.09 dB에 해당하는 SNR 최소값을 보이며 평균 27.39 dB의 SNR값을 갖는다. 유형 B의 경우 평균적으로 유형 C보다 심볼간 간섭현상에 의한 SNR 감소는 적게 받지만 장애물에 의한 SNR 감소는 크게 나타남을 알 수 있다. 유형 C의 경우 장애물 아래에서 유형 B보다 5.49 dB 큰 SNR값을 보임으로써 장애물에 의한 통신 품질의 감소가 훨씬 적음을 알 수 있다. 유형 C의 크기와 LED 칩의 거리값을 조절함으로써 심볼간 간섭현상과 장애물의 영향을 고려한 LED 조명등의 설계가 가능함을 보였다.

3.2. 변조 방식과 비트 에러율

OOK (On-off Keying) 변조방식의 경우 송신기는 비트값 '1'은 한 주기 동안 사각형 펄스를 출력하고 비트값 '0'은 펄스를 출력하지 않는다. 디지털 전송에서 신호대 잡음비와 비트 에러율(BER)은 $BER = Q(\sqrt{SNR})$ 이므로^[9], 심볼간 간섭현상(ISI)을 포함한 경우 BER을 만족하는 OOK 변조에 필요한 수신 전력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{OOK} = \sqrt{N_0 B + \gamma^2 P_{R,ISI}^2} Q^{-1}(BER) \quad (14)$$

PPM (Pulse-position Modulation) 변조의 경우 한

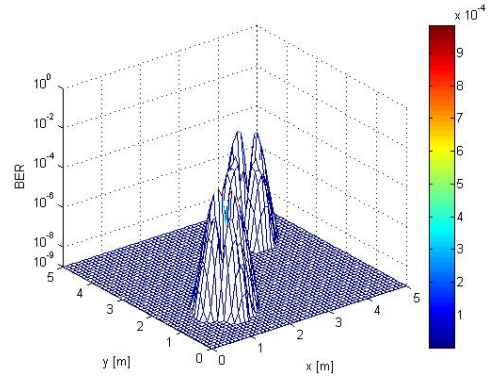


그림 6. 장애물과 전기채널 경로 차이가 있는 경우 VPPM 변조의 BER 특성 분포: $\delta=0.5$.
Fig. 6. BER distribution of VPPM under obstacles and bad cabling: $\delta=0.5$.

주기를 여러 개의 구간으로 나누어서 특정 구간에서만 광신호를 전송하는 방식이다. 2-PPM의 경우 OOK와 동일한 전력을 요구하며, 대역은 OOK에 비해 2배의 대역을 필요로 한다. IEEE P802.15.7 표준에 채택된 VPPM (Variable PPM) 변조방식은 2-PPM과 PWM (Pulse width modulation)을 결합하여 조명의 밝기 조절 기능을 제공한다^[4]. VPPM의 경우 BER을 만족하는 수신전력은 다음과 같다.

$$P_{VPPM} = P_{OOK} \text{ at } \delta = 0.5 \quad (15)$$

여기에서 δ 는 밝기조절 지수(dimming factor)이다. 그림 6은 장애물과 전기 채널의 경로 차이가 있는 경우 VPPM 변조의 BER 분포 특성을 보여준다. 데이터의 전송 속도는 10Mbps로 가정하였으며, LED 조명등에 대한 전기 채널의 길이가 동일한 경우 우수한 BER 특성을 제공한다. 하지만, 두 개의 LED 조명등에 대해서 전기선의 길이가 2.5 m 더 길게 연결한 적절치 못한 배선의 경우 BER 특성은 급격히 저하되어 9.3%의 영역에서 10^{-9} 보다 나쁜 BER 특성을 보였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 조명과 광무선 통신에 적합한 LED조명을 제안한다. 제안한 LED조명은 직접광을 방해하는 장애물의 영향을 줄여줌으로써 조명과 통신채널의 제공에 적합함을 보였다. 모델룸 내부에서의 수평조도 분포, 3-dB 컷오프 주파수 분포, 심볼간 간섭현상, 신호대 잡음비(SNR) 및 비트 에러율(BER) 분포를 분석함으로써 제안한 LED조명이 기존의 LED조명보다 장애물이 존재하는 경우 우수한

성능을 제공함을 보였다. 더불어, 심볼간 간섭현상 (ISI)을 고려한 비트 에러율(BER) 분포의 경우 장애물의 영향보다 전기적 채널의 경로 차이에 의한 영향이 크므로, LED 조명의 설계에 있어 전기채널의 경로 차이도 고려되어야 함을 보였다.

References

[1] J. Grubor, S. C. J. Lee, D.-D. Langer, T. Koonen, and J. W. Walewski, "Wireless High-Speed Data Transmission with Phosphorescent White-Light LEDs," *Proceeding of ECOC*, vol. 6, PD3.6, 2007.

[2] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama and M. Nakagawa, "Indoor Visible Light Transmission System Utilizing White LED Lights," *IEICE Trans. on Communications*, vol. E86-B, no. 8, pp. 2440-2454, Aug. 2003.

[3] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lightings," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, 2004.

[4] Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, *IEEE P802.15.7*, 2011.

[5] Physical Layer Design and Specification, *ICT-213311 OMEGA D4.2b*, 2011.

[6] Lighting of Indoor Work Places, *European Standard EN 12464-1*, 2003.

[7] J. Grubor, S. Randel, K.-D. Langer, and J. W. Walewski, "Broadband Information Broadcasting Using LED-Based Interior Lighting," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 24, pp. 3883-3892, 2008.

[8] V. Jungnickel, V. Pohl, S. Noenning, and C. von Helmolt, "A Physical Model for The Wireless Infrared Communication Channel," *IEEE Jour. Sel. Areas Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 631-640, 2002.

[9] H. Park and J. R. Barry, "Modulation Analysis for Wireless Infrared Communications," *Proceeding of IEEE Int. Conf. Communications*, pp. 1182-1186, 1995.

최수일 (Su-il Choi)



1990년 2월 전남대학교 전자공학과 학사
 1992년 8월 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
 1999년 8월 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사
 1999년~2004년 한국전자통신

연구원 광대역통합망연구단 선임연구원
 2004년 8월~현재 전남대학교 전자컴퓨터공학부 부교수
 <관심분야> 광가입자망, 광대역통신망, 광무선통신