

# 광무선통신기술을 이용한 차량간 메시지전달링크의 링크전송확률 분석

강문수<sup>†</sup> · 이충규<sup>\*\*</sup>

## 요 약

본 논문의 연구내용은 차량간 통신에 응용이 가능한 조명용 LED 광통신 링크의 링크전송성공률 분석에 관한 연구로서, 가시광통신에 기반한 차량간 메시지 전달 시스템을 모델링 하고, 광수신 파워를 통해 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)를 계산하고, 이에 따른 링크 전송성공확률을 계산함으로써, 가시광통신에 기반한 차량간 무선통신이 가능함을 검증하는 것이다. 저속이동 또는 정지 중인 차량의 후미등을 광송신기로 사용하고 후방차량의 전방에 장착된 광수신기를 이용하는 메시지 전달시스템에 있어, 각 차량의 위치가 정규확률분포를 따를 때, 광송신기 및 광수신기의 물리적 특성에 따른 링크전송성공확률을 계산한다. 먼저, 정규확률분포에 따라 차량의 위치를 랜덤하게 생성한 후, 각각의 광링크에 해당하는 BER을 계산하였다. 이를 통해, 전체 링크 중  $BER \leq 10^{-6}$ 을 만족하는 링크의 비율을 링크전송성공률로 정의한 결과, 송신 광파워가 400 mW이고 광송신기의 semi-angle at half power가 30도인 최적화되지 않은 차량간 광링크의 경우, 링크 전송성공률 90% 이상이 가능함을 확인하였다.

## Transmission Probability of Car-to-Car Message Delivery Link based on Visible Light Communications

Moonsoo Kang<sup>†</sup>, Chung Ghiu Lee<sup>\*\*</sup>

## ABSTRACT

In this paper, we perform a research on a message delivery link based on visible light communication using illumination light-emitting diodes (LEDs) for car-to-car communications and the link transmission success probability is analyzed for the link. The message delivery system is modeled and the signal-to-noise ratio is calculated from the received optical power. Then, the link transmission probability is estimated from the calculated bit error rates (BERs). The message delivery system has optical links from an LED transmitter near the rear lamp of a car ahead to a receiver near the headlamp of a car behind, whose positions are assumed to follow the normal Gaussian distribution. The link transmission success probability is calculated considering the physical characteristics of the optical link. The car positions are generated according to the normal distribution and the bit error rates are calculated for all links. The link transmission success probability is defined. For the unoptimized optical car-to-car message delivery links, it is shown that the link transmission success probability is larger than 0.9 with the transmitted optical power of 400 mW and the semi-angle at half power of 30 degree.

**Key words:** Optical Wireless Communication(광무선통신), Visible Light Communication(가시광 통신), Optical Communication(광통신), Light-Emitting Diodes(발광다이오드), Simulation(시뮬레이션)

※ 교신저자(Corresponding Author) : 이충규, 주소 : 광주광역시 동구 서석동 375번지 조선대학교 (501-759), 전화 : 062-230-7320 , E-mail : cleee@chosun.ac.kr  
접수일 : 2011년 5월 12일, 수정일 : 2011년 6월 12일  
완료일 : 2011년 6월 23일

<sup>†</sup> 정회원, 조선대학교 컴퓨터공학부  
(E-mail: mskang@chosun.ac.kr)

<sup>\*\*</sup> 정회원, 조선대학교 전자공학과

※ 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 기초연구지원사업(KRF-2008-331-D00330)으로 수행되었음.

## 1. 서 론

최근 발광다이오드(LED)의 저전력 소모, 긴 수명, 다양한 컬러재생, 친환경성 등 다양한 장점으로 인해 개발이 활성화되어, 발광 효율, 발광 패턴 등을 포함한 광특성이 향상되고 있다. 최근의 LED 소자 연구는 LED 소자 자체의 전기적 특성 및 광학적 특성을 개선하기 위한 연구를 중심으로 진행되어 왔다[1]. 이에 따라, TV 등 디스플레이 장치, 자동차용 램프, 이동통신장치 등 다양한 분야에 조명용 LED를 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 분야 중, 특히 디스플레이 장치용 backlight unit (BLU) 및 자동차 조명에 많이 사용되고 있는데, 다양한 탁상용 조명장치 제품도 시장에 나와 있는 상황이다.

다른 LED 응용 분야의 하나로써, 무선 통신시스템에 응용하기 위한 연구분야가 있다. 전통적으로 무선 광통신연구는 적외선 대역의 LED를 이용하는 적외선 데이터통신 (IrDA)에 관한 연구[2] 또는 적외선에 기반한 실내 무선통신링크의 링크성능분석에 대한 시뮬레이션 연구에 관한 것이 큰 비중을 차지하고 있다[3-5]. 그러나, 최근 가시광선 대역의 조명용 LED를 무선 통신시스템에 응용하는 가시광 무선통신(visible light communication)기술에 관한 연구도 유럽, 일본, 한국에서 많이 수행되고 있으며, 이러한 가시광통신 기술에 관한 연구는 조명용 LED의 낮은 대역폭을 극복하여 고속 데이터통신을 지원하기 위해, 통신 링크 가능성 검증, 응용시스템 모델 제안, 데이터율 향상에 관한 연구에 집중되어 있다[6-10].

근래에는 고주파 신호 전송에 기반한 무선통신 기술이 발전하여, 고주파 신호를 사용하는 무선통신기술을 활용하여 고속이동 중에도 정보를 전달하기 위한 차량간 통신기술이 활발히 연구되고 있다[11-13]. 이러한 방법들은 전파신호 간섭, 잡음, 전송되는 데이터 간의 충돌 등에 의한 신호품질 저하문제를 개선하고 고속이동 시에도 통신품질을 보장하기 위해, 송수신기 사이에서 신호전송 승인 요구, 신호전송 승인 신호 등의 제어신호를 사전에 주고 받아 무선 채널 사용을 예약한 후 데이터를 전송하는 등 복잡한 방식의 통신기술을 필요로 한다. 따라서 복잡한 프로토콜 및 부품 관련 표준화가 필요하게 되어 기술개발에 오랜 시간이 걸리는 단점이 있다. 이러한 고주파 신호를 통한 차량간 무선통신기술과 달리, 가시광 통신

에 기반한 차량간 메시지 전달시스템이 제안되었다[14]. 이 시스템은 가시광선대역의 발광 다이오드를 이용함으로써 주파수 규제를 받지 않을 뿐 만 아니라, 일반적으로 자동차의 후면에 설치되는 발광 다이오드를 포함하는 후미등을 광송신기로 이용할 수 있으므로, 추가적인 송수신기를 사용할 필요가 없게 되므로 비용절감 효과가 있다.

본 논문에서는 이러한 차량간 통신에 응용이 가능한 조명용 LED 광통신 링크의 성공을 분석에 관한 연구로서, 가시광통신에 기반한 차량간 메시지 전달 시스템을 모델링 하고, 수신 광파워를 통해 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)를 계산하고, 이에 따른 링크의 전송성공확률을 분석함으로써, 가시광통신에 기반한 차량간 무선통신이 가능함을 검증하고자 한다. 저속이동 또는 정지 중인 차량의 후미등과 후방차량의 전방에 장착된 광수신기를 이용하여 간단한 메시지 전달시스템에서, 각 차량의 위치를 확률적으로 가정하여, 광송신기 및 광수신기의 물리적 특성에 따른 링크 전송성공확률을 계산함으로써, 차량간 메시지 전달시스템의 활용 가능성을 확인하였다.

## 2. 링크 모델

### 2.1 차량간 메시지 전달 모델

본 논문에서는 차량간 메시지 전달 시스템을  $x$ - $y$  평면 상에서 그림 1과 같이 모델링하였다. 그림 1은 하나의 차량에서 다음 단계의 차량으로 정보를 전달하는 차량간 정보전달 시스템에서 제  $n$ 번째 차량의 후면에 부착되는 광송신기로부터  $n+1$ 번째 차량의 전면에 부착되는 광수신기로 메시지를 전달하는 구조를 보여주며, 각 차량에는 수신된 정보 신호를 처리하여 디지털 데이터로 변환, 처리, 송수신 제어를 담당하는 제어장치를 포함하며, 이러한 신호처리 과정 중에 데이터 손실이 없는 것으로 가정한다.

그림 1에서 점선은 옆 차로에 위치한 차량의 광송신기 신호가 간섭광으로 작용할 수 있음을 나타내며, 실선의 화살표는 광송신기로부터 데이터가 전송되는 광수신기로의 방향을 나타내기 위한 것이다. 위의 모델은 정지 상태 또는 저속 운행 상태를 가정하여, 본 시스템의 메시지 전달시간 동안 차량간 위치의 변화가 없는 것으로 가정한다. 또한, 각 차량에 설치되어 있는 광송신기와 광수신기의 특성은 각각 동일

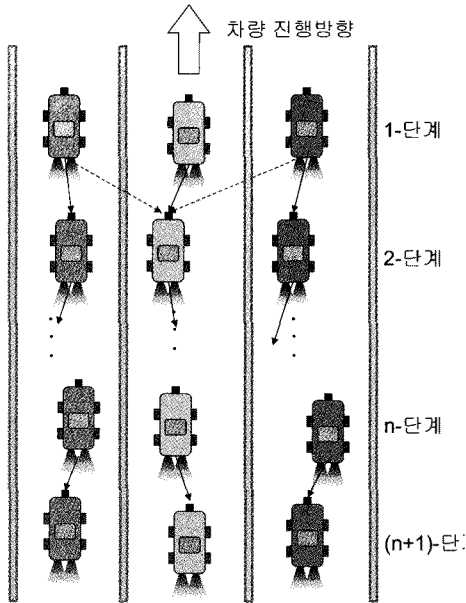


그림 1. 차량간 메시지 전달시스템의 구성

한 것으로 가정한다. 상황에 따라, 각 단계에 있어 차량간 위치가 변화함에 따라 각 차량간 광링크 특성 역시 변화하게 되는데, 이를 통계적으로 분석하여 전체 메시지 전달 시스템의 메시지 전달 성공확률을 계산하게 된다. 이를 위해, 차량간 광링크 특성을 분석하기 위한 광링크 모델이 그림 2에 나타나 있다.

두 대의 차량을 (x, y) 좌표계 상에 위치시키고, 전방에 위치한 차량을 기준으로 후방에 위치한 차량

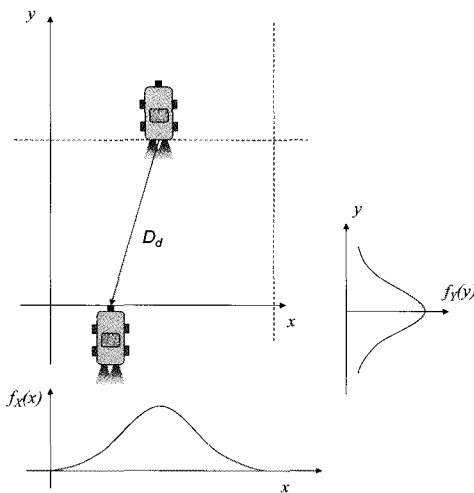


그림 2. 차량간 메시지 전달시스템의 물리적 링크모델

의 상대적 위치를 고려하여 광링크를 통한 수신광파워를 계산한다. 전체 시스템의 광송신기 및 광수신기의 성능은 동일한 것으로 가정하고, 차량 사이에 장애물이 없는 환경이므로, 광링크의 특성은 차량 사이의 상대적 위치에 의해 결정된다. 실제의 경우, 후방 차량의 운전자가 차량을 정지시키는 경우, 충돌을 피하기 위해 적절한 간격을 두고 차량을 정지시키고자 노력하며, 좌우로는 차로를 벗어나지 않는 선에서 중심축을 정렬하고자 노력하는 것이 일반적이다. 이러한 상황을 고려하여, 후방 차량의 (x, y) 좌표가 각각 정규분포(normal distribution)를 따르는 것으로 가정하였고, x와 y에 대한 확률밀도함수는 다음과 같다[15,16].

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \tag{1}$$

$$f_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{(y-m_y)^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

이 연구에서  $m_x = 0, \sigma_x = 0.4, m_y = 2, \sigma_y = 0.4$ 으로 가정하였다.

### 2.2 광링크 모델

차량간 광링크를 구성하는 광송신기로부터  $P_t$ 의 평균 송신광파워의 광신호를 송신할 경우, 평균 수신광파워는 다음 식을 통해 구할 수 있다[5-7].

$$P_r = H(0) \cdot P_t \tag{2}$$

여기서 채널 직류이득(DC gain)은  $H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)dt$  이고,  $P_r$ 는 평균 수신광파워를 의미한다.

송신 광파워는 송신 경로에 따라 전송되므로, 차량간 광링크의 채널은 여전히 다중경로에 의한 왜곡(multipath induced distortion)에 영향을 받게 된다. 그러나, 옆 차로에 위치한 차량의 광송신기로부터의 간섭광 성분 및 반사체에 의한 반사광 성분은 직사광 성분보다 매우 약하게 되므로, 본 논문에서는 직사광 링크 성분만을 고려하기로 한다. 또한, 안개, 강우 등 기상상황에 따라 신호감쇠가 나타날 수 있으며, 이는 채널 DC gain에 영향을 주게 되는데, 2.5 cm/h의 강우는 6 dB/km의 감쇠를 가져오고, 강설의 경우 3 dB/km로부터 30 dB/km까지 신호감쇠를 가져올 수도 있고, 이들 감쇠계수는 파장의존성이 비교적 낮은 것으로 보고되었다[17,18]. 그러나, 본 논문

에서 분석하는 광링크의 거리는 5미터 내외로 설정되어 있어, 6 dB/km 신호감쇠의 경우, 0.03 dB의 신호감쇠에 해당되므로, 대부분의 정상시 일기에 있어서는 무시할 수 있다.

그림 3은 두 차량 사이의 광링크의 기하학적 모델을 보여주고 있다. 광송신기는 전방의 차량으로부터 후방 방향을 수직으로 향하고 있고, 광수신기는 후방 차량으로부터 전방 방향을 수직으로 바라보고 있다. 이 경우, 광송신기의 복사각(irradiance angle)  $\phi$ 과 광수신기의 입사각(incidence angle)  $\psi$ 이 같아지게 된다( $\phi \approx \psi$ ). 가시성(LOS; line-of-sight) 광송신기는 일반적인 Lambertian 방사특성으로 모델링이 가능하며, 다음과 같은 채널 직류이득의 식을 얻을 수 있다[5-7].

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m(\phi) T_s(\phi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (3)$$

이 식에서  $\Psi_c$ 는 광수신기의 field-of-view (FOV)를 의미하고,  $m$ 은 Lambertian emission의 차수를 나타내는 식으로서, 다음 식으로 표현된다[5]:

$$m = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2}) \quad (4)$$

이 식에서,  $\Phi_{1/2}$ 는 LED의 성능변수인 semi-angle at half power를 의미한다. 예를 들어,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$ 인 경우,  $m$ 은 1이 된다. 또한,  $\Phi_{1/2} = 45^\circ$ 인 경우,  $m$ 은 2가 되고,  $\Phi_{1/2} = 30^\circ$ 인 경우,  $m$ 은 4.8이 된다.

또한, 그림 3에서  $D_d$ 는 광송신기로부터 광수신기까지 직사광의 경로 거리를 의미한다.  $T_s(\psi)$ 는 광송신기의 신호 송신 필터 이득을 의미하고,  $g(\psi)$ 는 광수신기의 집광기(concentrator) 이득을 의미하고, 이는 집광기를 이루는 재료의 굴절률의 제곱, 즉,  $n^2$ 으로 근사화할 수 있다.

이러한 평균 송수신 광파워를 갖는 디지털 무선광통신 링크는 대역폭  $B$ 에 대해 수신기에서 다음 수식에 표현된 신호대잡음비 (SNR) 값을 갖는다.

$$SNR = \frac{R^2 P_r^2}{N_0 B} = \frac{R^2 H^2(0) P_t^2}{N_0 B} \quad (5)$$

위의 식에서  $R$ 은 광검출기의 responsivity [A/W]를 의미하고, 잡음은 double-sided power spectral density의 값이  $N_0$  [W/Hz]인 백색 Gaussian 성분에 의해 지배됨을 가정한 것이다.

### 3. 시뮬레이션 및 결과

전방차량의 후방에 장착된 광송신기는 (0,0)에 위치하는 것으로 설정하였다. 후방 차량의  $x$ -좌표는 0을 중심으로, 0.4의 표준편차를 갖는 정규분포(normal distribution)로 하였고, 후방 차량의  $y$ -좌표는 2를 중심으로 0.4의 표준편차를 갖는 정규분포로 정하였다[15,16]. 그림 4에 나타나 있는 점들은 위의 분포를 따르는 광수신기의 위치를 보여주고 있다. 후방차량의 위치에 대한 표본의 수가 많을 수록, 즉, 계산 지점의 수가 많을수록, 계산의 신뢰도가 높아지게 되는데, 이 95% 신뢰수준을 얻기 위한 표본의 크기를 결정하기 위한 이론을 본 논문의 시뮬레이션에 적용하면[19], 약 497개의 표본의 수를 얻게 된다. 이를 근거로 하여, 표본의 수를 5000개로 정하였다.

차량 후미등의 광송신기에 사용되는 적색 LED의 광파워는 하나 당 4 mW로 가정하고, 램프에 100개의 LED를 장착한 것으로 가정하면, 식(2)로부터 광송신파워  $P_t$ 는 400 mW가 된다. 본 시뮬레이션은 기존에 사용된 파라메타값들을 사용하여 차량간 통신 응용이 가능함을 확인하기 위해, 기존 관련 논문들의 물리적 값들을 사용하였다[6,20], 광수신기의 특성은 기존 시뮬레이션 연구에서 사용된 값을 사용하였다[6]. 광필터 이득은 1이고, 집광기의 굴절률은 1.5이다. 광전변환효율은 0.53 A/W이고, 광검출기의 감지영역의 면적은  $1.0 \text{ cm}^2$ 으로 하였다. 잡음은 AWGN으로 가정하고, 직사광에 의한 간섭광의 파워를 9.62 mW로 정하였고, 광수신 대역폭은 100 MHz로 정하였다[17].

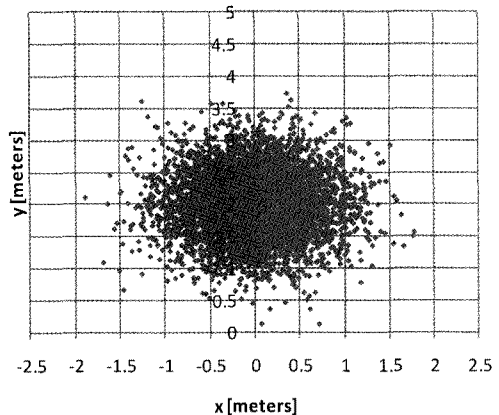


그림 3. 위치 확률분포에 따른 광수신기의 위치 분포도

식 (6)을 이용해  $SNR = (R \cdot P_{received}) / \sigma_{total}^2$  을 구할 수 있고, NRZ (non-return-to-zero) 파형의 신호를 이용한 OOK-IM (on-off keying-intensity modulation) 변조와 직접검출(direct detection) 방식의 복조를 수행하는 통신시스템의 경우에 대해, 비트 오류(BER; bit error ratio)을  $Q$ -함수 또는  $erfc$ -함수를 사용하여[15,16], 다음 식을 통해 계산할 수 있다.

$$BER : OOK = Q(\sqrt{SNR}) \tag{6}$$

$$BER : OOK = \frac{1}{2} erfc(\sqrt{SNR/2})$$

그림 5는 그림 4에 나타나 있는 광수신기 지점에

따른 수신광파워를 계산하여 수신광파워의 구간에 해당되는 링크의 수를 히스토그램으로 표시한 것이다. 전방 차량을 기준으로 하여 후방차량의 위치를 생성하고, 각 링크의 거리와 광송수신기 사이의 상대적 위치에 따른 수신광파워를 계산하고, 적절한 광파워 구간을 설정하여 수신광파워에 따른 링크의 수를 계산하였다. 그림 5(a), 5(b), 5(c)는 각각  $m=1$  ( $\Phi_{1/2} = 60^\circ$ ), 2 ( $\Phi_{1/2} = 45^\circ$ ), 4.8 ( $\Phi_{1/2} = 30^\circ$ )에 해당하며,  $m$ 이 증가함에 따라, 즉, semi-angle at half power가 감소함에 따라 수신광파워가 증가하는 광링크의 수가 많아짐을 확인할 수 있다.

식 (1), (5), (6) 으로부터 계산한 BER 히스토그램의 결과는 그림 6에 있다. 수신광파워로부터 식(5)를

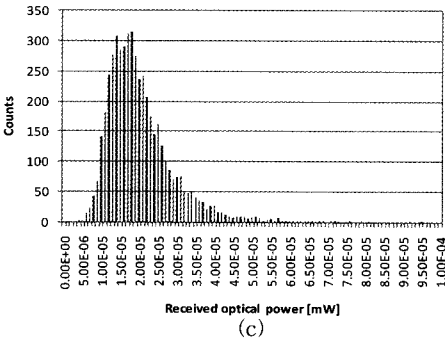
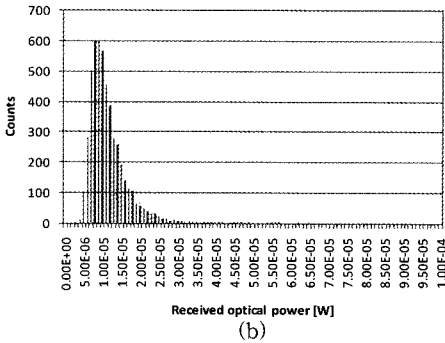
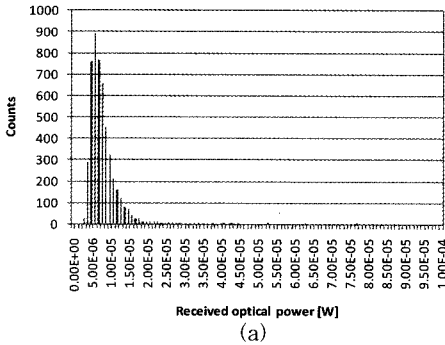


그림 4. 수신 광파워 구간에 따른 링크 수의 분포. (a)  $m=1$  (b)  $m=2$  (c)  $m=4.8$ .

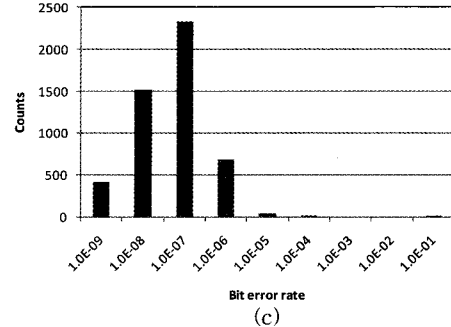
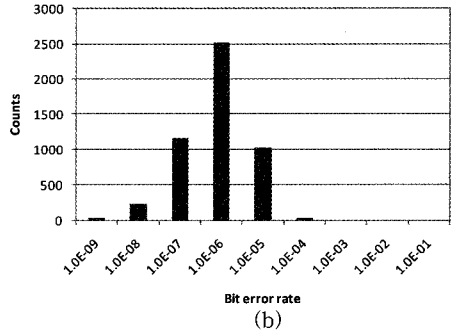
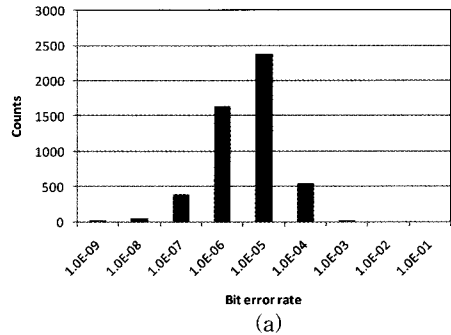


그림 5. 비트에러율 구간에 따른 링크 수의 분포. (a)  $m=1$  (b)  $m=2$  (c)  $m=4.8$ .

이용하여 신호대잡음비를 계산한 후, 식(6)를 이용하여 BER을 계산하였다. 그림 6(a), 6(b), 6(c)는 각각  $m=1$  ( $\Phi_{1/2} = 60^\circ$ ), 2 ( $\Phi_{1/2} = 45^\circ$ ), 4.8 ( $\Phi_{1/2} = 30^\circ$ )에 해당하며,  $m$ 이 증가함에 따라, 즉, semi-angle at half power가 감소함에 따라,  $BER \leq 10^{-6}$ 을 만족하는 광링크의 수가 많아짐을 확인할 수 있다.

고속 광섬유 광통신 시스템은  $BER=10^{-9}$ 이 되는 경우를 비트오율 기준값으로 하지만, 고주파 무선통신시스템 시스템의 성능을 비교할 경우,  $BER=10^{-6}$ 을 기준으로 하므로[18], 하나의 광링크에 대해  $BER \leq 10^{-6}$ 인 경우를 전송 성공으로 판단하면, 계산을 수행한 전체 링크 수에 대한 BER을 만족하는 링크 수의 비율을 전송링크 성공확률( $P_{link}$ )로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{link} = \frac{BER \leq 10^{-6} \text{을 만족하는 링크의 수}}{\text{계산된 전체 링크의 수}} \quad (7)$$

시뮬레이션에 따르면,  $m = 1$  인 경우, 링크전송 성공율은 0.41,  $m = 2$ 인 경우는 0.795,  $m = 4.8$ 인 경우는 0.99로 계산되었다. 후방차량의 위치에 관한 표준편차  $\sigma_x, \sigma_y$ 는 전방차량을 기준으로 후방차량의 위치 분포에 영향을 주게 된다. 따라서, 이들 값이 증가할 경우, 후방차량의 위치가 중심을 기준으로 넓게 분포하게 되어, 해당 광링크의 거리가 증가하게 되므로, 결과적으로 전송성공링크의 수가 감소하고, 전체 링크를 고려했을 경우 링크전송성공 확률이 감소하게 된다. 이들 값이 물리적 현상을 정확히 반영하기 위해서는, 실제 다수의 차량 정지상태 분포도를 측정하여야 하며, 이는 추가 연구를 통해 수행되어야 할 것이다.

본 연구는 정지 시 또는 저속주행중인 차량들 사이의 메시지 전달에 관한 것인데, 경우에 따라 고속도로와 같은 고속주행 상황에 대해서 고려해 볼 수 있다. 이 경우, 고속이동 중임에도 불구하고, 차량간 거리의 변화는 적을 수 있다. 본 연구 결과에 따르면, 링크전송성공 확률은 광송신기의 출력광파워와 광송신기의 semi-angle at half power와 관계되므로, 고속도로에서 운행중인 차량들에 본 시스템을 적용하기 위해서는 높은 출력광파워, 좁은 semi-angle at half power를 통해 원거리 전송성능을 확보하여야 한다.

본 논문에서 시뮬레이션을 수행한 메시지 전달시스템은 하나의 차량에서 다수의 차량으로 메시지 전

달이 가능하도록 추가연구가 진행될 수 있다. 이를 위해서는, 광필터, 집광기 등 사용되는 광소자의 특성을 충분히 고려하여야 하며, 데이터 복원성능을 향상시키기 위한 번복조 기술이 추가되어야 한다. 또한, 태양광 이외의 다양한 간섭광의 영향도 고려하여야 한다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 차량간 가시광 무선광통신 링크에 있어 링크성공확률을 계산하였다. 일반적인 링크특성을 확인하기 위하여, 광링크 특성을 개선하기 위한 광소자들의 특성을 최적화하지 않고 시뮬레이션을 수행하였다. 후방차량의 정지 위치가 정규분포를 따르는 경우, 5000개의 링크를 랜덤하게 생성하여, 각각의 광링크를 통해 수신되는 광파워를 계산하고, 그로부터 BER을 계산하였다. 이를 통해 전체 링크 중,  $BER \leq 10^{-6}$ 을 만족하는 링크의 비율을 링크 전송성공율로 정의하였다.

본 논문의 결과에 따르면, 최적화되지 않은 차량간 광링크에 대해, 송신 광파워가 400 mW 이고, 광송신기의 semi-angle at half power가 30도 일 경우, 링크 전송성공율이 90% 이상 가능함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes* (Cambridge University Press: Cambridge, U.K. 2003).
- [2] C. D. Knutson and J. M. Brown, *IrDA Principles and Protocols* (MCL Press: Salem, USA, 2004).
- [3] J. B. Carruthers and P. Kannan, "Iterative site-Based Modeling for Wireless Infrared Channels," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 50, 759-765, 2002.
- [4] J. B. Carruthers, S. M. Carroll, and P. Kannan, "Propagation Modelling for Indoor Optical Wireless Communications using Fast Multi-Receiver Channel Estimation," *IEE Proceedings-Optoelectronics* 150, 473-481, 2003.
- [5] J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless Infrared Communications," *Proc. IEEE* 85, 265-298, 1997.

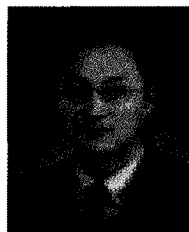
- [6] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Indoor Visible Light Data Transmission Utilizing White LED Lights," *IEICE Trans. Communications* E86-B, pp. 2440-2454, 2003.
- [7] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. Consumer Electron.* 50, pp. 100-107, 2004.
- [8] C. G. Lee, C. S. Park, J.-H. Kim, and D.-H. Kim, "Experimental Verification of Optical Wireless Communication Link Using High-Brightness Illumination Light-Emitting Diodes," *Opt. Eng.* 46, 125005-1~125005-7, 2007.
- [9] J. Vucic, C. Kottke, S. Nerreter, and K.-D. Langer, J. W. Walewski, "513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED," *J. Lightwave Technol.* 28, 3512-3518, 2010.
- [10] H. L. Minh, D. C. O'Brien, G. F. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, and Y. Oh, "High-Speed Visible Light Communications using Multiple-Resonant Equalization," *IEEE Photonics Technology Letters.* 20, 1243-1245, 2008.
- [11] H. Hartenstein and K. P. Laberteaux, "A Tutorial Survey on Vehicular Ad Hoc Networks," *IEEE Commun. Mag.* 46, 164-171, 2008.
- [12] <http://www.car-to-car.org>
- [13] 이상우, 조한벽, 오현서, 곽동용, "차량 통신 네트워크(VANET) 표준화 동향," *한국멀티미디어 학회지*, 제12권, 제4호, 1-9, 2008년.
- [14] Chung Ghiu Lee, Inter-vehicle information delivery system, Patent (South Korea), 10-0996284, 17, 2010.
- [15] A. Leon-Garcia, *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, 2nd edition(Addison Wesley, Reading, USA, 1994).
- [16] R. E. Ziemer and W. H. Tranter, *Principles of Communications*, 5th edition (John Wiley and Sons, 2001).
- [17] H. Willebrand and B.S. Ghuman, *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in today's network* (SAM Spublishing: Indianapolis, USA, 2002).
- [18] E. Leitgeb, S. S. Muhammad, B. Flecker, C. Chlestil, M. Gebhart, and T. Javornik, "The Influence of Dense Fog on Optical Wireless Systems, Analysed by Measurements in Graz for Improving the Link-Reliability," *Proc. ICTON 2006*, pp. 154-159, Nottingham, UK, June 2006.
- [19] R. Jain, *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling* (Wiley-Interscience, New York, USA, 1991).
- [20] A. J. C. Moreira, R. T. Valadas, and A. M. O. Duarte, "Optical Interference Produced by Artificial Light," *Wireless Networks* 3, 131-140, 1997.

강 문 수



1998년 KAIST 전산학과 공학사  
 2000년 ICU 공학부 공학석사  
 2007년 ICU 공학부 공학박사  
 2007년~현재 조선대학교 컴퓨터 공학부 조교수  
 관심분야: Network congestion control, Sensor networks, Mesh networks, VANET, 병렬시스템 등

이 충 규



1997년 한국과학기술원(KAIST) 전기및전자공학과 공학사  
 1999년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과 공학석사  
 2003년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과 공학박사

2004년~2006년 한국과학기술원 연구원, 선임연구원  
 2006년~현재 조선대학교 전자공학과 전임강사, 조교수  
 관심분야: 광통신시스템, 광통신소자, 무선광통신 등