

# LED를 이용한 VLC-CDMA 통신 시스템 성능 분석

## Performance of VLC-CDMA Communication System Using LED

배수진\*                      홍영조\*\*                      이계산\*\*\*  
 (Su-Jin Bae)                (Yeong-Jo Hong)            (Kye-San Lee)

### 요약

백색 LED(Light Emitting Diode: 발광다이오드)는 고휘도, 향상된 안정성, 낮은 전력 소비, 그리고 긴 수명 등 유리한 특성을 제공한다. LED는 전기 신호를 광신호로 변환시킴으로써 광통신 실내 무선 광 조명실뿐만 아니라, 무선 광 통신 시스템에도 사용되는 전자 소자이다. 현재 이러한 백색 LED에 대해서 다양한 연구가 진행 중이며, 본 논문에서는 이러한 백색 LED를 이용한 VLC(Visible Light Communication: 가시광통신)의 다중 접속 방식을 논의한다. 제안된 시스템에서는 현 VLC 시스템의 간섭을 줄이고, 수용량을 늘리기 위해 CDMA(Code Division Multiple Access: 코드 분할 다중 접속)를 VLC 시스템에 적용한다. 또한 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널과 Diffuse 채널에서의 OOK(On-off keying) 변조와 BPSK 변조를 사용한 VLC-CDMA 통신 시스템을 비교해봄으로써 OOK 변조의 우수성을 결과의 분석을 통하여 나타내었다. 그리고 다중경로환경에서와 AWGN 환경에서의 BER을 비교함으로써 다중경로에 의한 간섭의 해결의 중요성을 검토한다. 다중 접속 방식으로 인한 ISI(Inter Symbol Interference)를 제거하여 시스템의 효율을 높이기 위해 Directed LOS(Line Of Sight)와 Diffuse Link를 가정하여 광 확산 코드인 OOC(Optical Orthogonal Code: 광 직교 코드)를 적용한 VLC-CDMA를 제안하고, 성능 분석을 제시한다.

### Abstract

White LEDs(Light Emitting Diode) offer advantageous properties such as high brightness, improved reliability, lower power consumption, and long lifetimes. An LED is an electronic device that converts an electrical signal into a light signal and is used not only in Optical Communication Indoor wireless optical illuminating rooms, but also for wireless optical communication systems. Currently, studies about these white LEDs have been being progressed, and in this paper, we discuss the multiplex and the multiple access method of VLC(Visible Light Communication) systems using white LEDs. In proposed system, CDMA(Code Division Multiple Access) applies to VLC system to reduce interference of VLC system, and improve capacity. The superiority of OOK modulation is presented in analysis of results by comparing VLC-CDMA communication system using OOK(On-off keying) modulation and BPSK modulation in AWGN(Additive White Gaussian Noise) channel and Diffuse channel. And we investigate the significance of a solution of interference by multipath by comparing BER in multipath channel and AWGN channel. In the proposed system, we assume Directed LOS(Line Of Sight) and Diffuse Link, and suppose VLC-CDMA using OOC(Optical Orthogonal Code) as methods to increase efficiency of system by removing ISI(Inter Symbol Interference) caused by multiple access, optical spreading code, and also present an analysis of its performance.

**Key words:** Optical wireless communication, visible light communication system, OOK-CDMA

† 이 논문은 중소기업청 『산학 공동기술개발 지원사업』 ‘차세대 텔레메틱스용 가시광 통신 모듈 개발’의 일환으로 수행되었습니다. (중소기업청 공고 2008-44)

\* 주저자 : 경희대학교 전자·전파공학과 박사과정

\*\* 공저자 : 경희대학교 전자·전파공학과 석사과정

\*\*\* 공저자 : 경희대학교 전자·전파공학과 교수

† 논문접수일 : 2009년 1월 10일

† 논문심사일 : 2009년 2월 6일(1차), 2009년 4월 6일(2차)

† 게재확정일 : 2009년 4월 7일

## I. 서론

LED의 발광 효율의 향상과 가격 하락으로 인해 전광판, 교통 신호등, 경관 조명용, 모바일 기기, 자동차, 일반 디스플레이 가전제품의 BLU(Back Light Unit) 등의 특수 조명뿐만 아니라 형광등, 할로겐램프, 백열전구 등의 일반 조명에도 LED가 적용되고 있다. LED 조명은 일반 백열전구의 5분의 1, 형광등의 3분의 1 수준의 전력만 있으면 작동이 가능하기 때문에 에너지 효율성이 좋으며, LED의 수명은 약 5만 시간으로, 일반 백열등이나 형광등에 비해 10배 이상 길다. 뿐만 아니라 유해물질이 전혀 사용되지 않는 친환경적인 제품으로 각광받고 있다. 이러한 이유로 임질화갈륨(InGaN)다이오드 구조를 기반으로 한 기존의 고효율 청색 및 녹색 LED는 낮은 조도로 인해 부적절함에도 불구하고 상용되어 왔다. LED 조명의 가장 효율적인 한 가지 형태는 빛의 삼원색(적색, 녹색, 청색)을 조합하는 것인데, 적절한 비율로 조합할 경우 형광체를 사용하지 않고 백색광을 발생시킬 수 있다. 백색 LED는 미래의 조명 산업에서 성장성이 가장 높은 분야가 될 것으로 예측된다[1]. 기존의 조명 방법과 비교하였을 때, 백색 LED는 낮은 에너지 소비, 긴 수명, 초소형, 적은 전력 소비, 내진동성 및 내충격성 등의 특성을 가지고 있다. 최근에는 LED 교통 신호등이 도로가에 설치되고 있고, LED로 구성된 대형 전자 게시판도 생산되고 있다. 게다가, 한 단체는 실내의 무선 네트워크를 위한 백색 LED를 채용하는 무선 광 통신 시스템(Wireless Optical Communication System)을 제안했다[2]. 이 시스템에서 백색 LED는 가시광을 이용하여 광소자뿐만 아니라 통신 장치로도 사용되고 있다. 이 듀얼 기능의 백색 LED는 많은 새로운 종류의 장치에 대한 가능성을 제공하고 있다.

본 시스템은 전파나 적외선 시스템과 달리 눈에 보이기 때문에 시각적 관리가 가능하고, 설치가 용이하며, 다른 전파로부터 간섭받지 않을 뿐만 아니라 정보를 수신할 때 안테나와 같은 장치가 필요 없어 경관이나 미관을 해치지 않아도 된다는 특징이 있다. 또한 제안 시스템은 고속 데이터 전송률 광 송

신을 위해 충분한 전력을 가지게 되고, 실내에 분포된 조명에 의해서 그림자가 지는 것을 피할 수 있다. 그러나 이 시스템은 일반적으로 천장에 조명기구가 설치됨으로써 다중경로로 인한 ISI가 발생하고 이로 인해 광행로차(Optical Path Difference)가 발생한다.

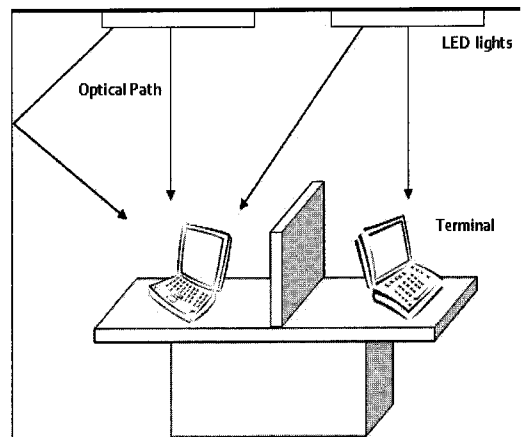
현재의 연구는 다중 접근 방식을 고려하지 않는 시스템의 조도와 관련한 변조 방법이 논의되고 있다. 본 논문은 CDMA를 이용한 Multi-user VLC에 대해서 논의한다. 특히 OOK(OOK - NRZ)변조 방식 및 코드 분할 방식을 사용한 VLC-CDMA의 성능을 분석했다. 제안 시스템의 분석을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 가시광 통신 시스템 모델에 대하여 알아본다. 3절에서는 제안 시스템을 알아본다. 4절에서는 제안된 시스템의 통신 성능 특성을 분석한다. 5절에서는 주요 결과에 대해 결론을 짓고 향후 연구의 진로를 제시하였다.

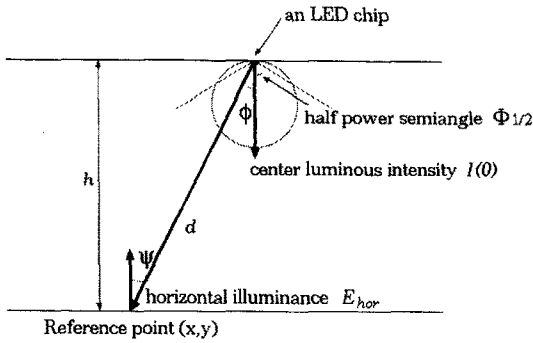
## II. 가시광통신시스템 모델

### 1. Channel Model

<그림 1>은 기존의 VLC시스템을 나타낸다. 홈 네트워크에 도착한 정보는 각 공간의 Optical Access Point에서 외부로 전송되며 동시에 백색 LED로 구성된 AP(Access Point)는 빛을 제공하는 기능이 있다.



<그림 1> 가시광 통신  
<Fig. 1> Visible light communication



<그림 2> 수평 조도에 대한 파라미터  
<Fig. 2> Parameters for horizontal illuminance

AP에서의 백색 LED는 단지 공간을 비추는 것만이 아닌 전기신호를 가시광신호로 변조하여 신호를 공기 중으로 방출한다. 변조된 빛의 파동은 점멸 정도가 매우 빠르기 때문에 인간의 눈으로는 감지 할 수 없다. 전기에서 빛으로 변환되는 속도는 30nm~250nm에 이르며, 사람은 초당 100회 이상 점멸한다면, 그것을 인식하지 못하고 계속 빛을 인식하게 된다. 따라서 조명의 기능은 무선 광통신에 의해서 상실되지 않는 동시에 조명의 기능을 유지할 수 있다.

이 시스템에서는 정보를 광의 세기로 변환하여 전달하는 IM-DD (Intensity Modulation and Direct Detection) 변조 방식을 이용하여 광변조를 수행한다. 수신 신호 세기의 예측을 위해 Directed LOS와 Diffuse Link를 가정한다. Directed LOS와 Diffuse Link에서 광 경로는 방해받지 않는다. 사용자의 터미널은 광 펄스를 전기신호로 변환할 수 있는 PD(Photo Diode:포토다이오드)로 구성된다.

기존의 시스템에서 조도는 LED에서 방출된 빛만을 고려하였다. 일반적으로, 조명의 조도는 ISO(국제표준화기구)에 의해 표준화된다. 이 표준에 의해서 사무실에서는 300~1500lx의 조도가 필요하다. 수치분석[3, 4] 결과 600~1000lx의 조도를 가지는 백색 LED는 충분한 조도를 제공하는 동시에 통신을 하기에 가능하였다.

## 2. Wireless Optical Channel

본 논문의 목표를 위해, 무선 광 채널을 제시하였

고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 광 링크에서 채널 DC 이득은 다음의 수식에서 알 수 있다 [5, 6].

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\Phi) T_s(\Psi) G(\Psi) \cos(\Psi), & 0 \leq \Psi \leq \Psi_c \\ 0 & 0 > \Psi_c \end{cases} \quad (1)$$

여기서 A는 PD에 있는 검출기의 물리적 영역이며, d는 송신기와 수신기사이의 거리이다.  $\Psi$ 는 입사각을 나타내고,  $\Phi$ 는 조도각(Angle of Irradiance)을 나타낸다.  $T_s(\Psi)$ 는 광 필터의 이득을 나타내고,  $G(\Psi)$ 는 광 집중장치의 이득을 나타내며,  $\Psi_c$ 는 수신기의 안계(Field of Vision)의 폭을 나타낸다. 광 집중장치(Optical Concentrator)  $G(\Psi)$ 는 다음과 같이 주어진다 [7].

$$H(0) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \Psi \leq \Psi_c \\ 0 & \Psi > \Psi_c \end{cases} \quad (2)$$

여기서 n은 굴절률을 나타낸다.

## 3. Noise Model

본 장에서는 AWGN 모델에 대해서 논의된다. 광 채널에서 원래의 전송품질은 산탄 잡음(Shot noise)에 의해 결정된다. 원하는 신호는  $10^4 \sim 10^6$  photons/bits의 평균적인 전송률을 가지는 시변 산탄잡음(Time-varying Shot-noise)을 포함한다. 그러나 이 채널 모델에서는 수신기가 협대역 광 필터를 사용하더라도 강렬한 주변광은 검출기에 영향을 주어  $10^7 \sim 10^8$  photons/bits의 속도를 가지는 지속적인 열잡음을 방출한다. 따라서 산탄 잡음은 무시되고, 무선 광 채널 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$y(t) = x(t) \otimes H(\tau) + n(t) \quad (3)$$

여기서  $y(t)$ 는 수신신호과정을 나타내며,  $x(t)$ 는 송신된 광 펄스를 나타내고  $n(t)$ 는 AWGN을 나타낸다. 그리고  $\otimes$ 는 컨볼루션을 나타낸다.

제안 시스템은 Directed LOS 경로에서 수행된다. 따라서 송신 펄스는 간섭받지 않으며  $H(\tau) = H(0)$ 의 관계가 성립된다. 수신 광 전력  $P_r$ 은 다음 식과 같이

송신 광 전력으로부터 파생된다,

$$P_r = H(0) \cdot P \tag{4}$$

또한 무선 광 전자기에서 다중 경로 페이딩은 무시 될 수 있다. 이 채널 모델에서의 정보 반송파는 약  $10^{14}\text{Hz}$ 의 주파수를 가지는 빛 파동이다.

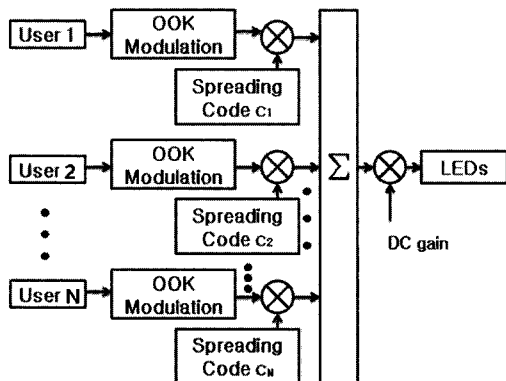
그러므로, 페이딩의 도플러 주파수는 데이터 전송 속도보다 더 높다. 게다가 공간 다이버시티(Spatial Diversity)는 다중 경로 페이딩을 감쇠시키는데 효율적인데, 검출 용량은 이러한 공간 다이버시티를 가지는 수천 개의 파장에 따라 결정된다. 이러한 이유로 다중 경로 페이딩은 무시될 수 있다.

### III. VLC-CDMA 통신

#### A. OOC(Optical Orthogonal Code:광 직교 코드)

가시광 OOK-CDMA 통신은 무선 주파수의 CDMA 통신과 같은 방법이다. 그러나 특수 코드 사용에서의 가시광 OOK-CDMA는 무선 주파수의 CDMA와 다르다. 가시광 OOK-CDMA에서의 광 직교 코드는 (0, 1)시퀀스 집합이다. 본 시스템은 VLC 시스템에 CDMA를 적용함으로써 주파수 이용효율을 높이고, 채널 용량을 증대시킨다. 또한 페이딩에 강할 뿐만 아니라 외부의 협대역 간섭신호에도 강하기 때문에 용량을 증가시키는데 영향을 준다.

OOC는 이상적인 자기상관(Auto-correlation)과 상



<그림 3> OOK-CDMA에 대한 전송 부분  
<Fig. 3> Transmission part for OOK-CDMA

호상관 (Cross-correlation)의 특성을 가지고 있다. 좋은 성질의 자기상관은 원하는 신호의 효율적인 검출에 용이한 반면에 낮은 상호상관은 다른 사용자와 채널 잡음으로부터 발생하는 간섭을 줄이는 것에 용이하다.  $C(n, w, \lambda_a, \lambda_c)$ 로 표현되는 광 직교 코드는 다음과 같은 두 가지 특성을 만족시키는 길이 n과 무게 w를 가진다 [8].

#### 1) 자기상관특성

$$\sum_{t=0}^{n-1} x_t x_{t+\tau} \leq \lambda_a \tag{5}$$

여기서,  $x \in C$  이며, 모든 정수  $\tau$ 는  $0 < \tau < n$ 이다.

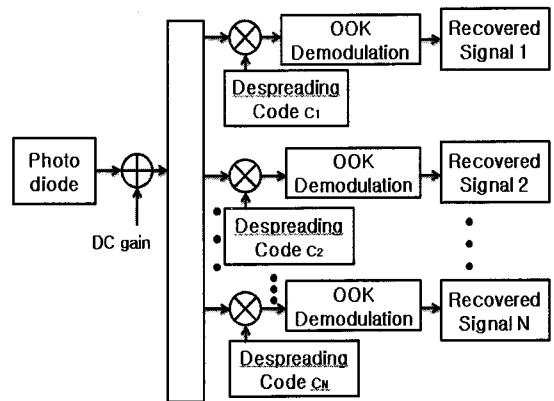
#### 2) 상호상관특성

$$\sum_{t=0}^{n-1} x_t y_{t+\tau} \leq \lambda_c \tag{6}$$

여기서 모든 정수  $\tau$ 에 대해서  $x \neq y \in C$  이며, 자기상관과 상호상관 각각  $\lambda_a$  와  $\lambda_c$ 에 의해서 제한된다.

#### 2. 가시광 OOK-CDMA 통신 모델

<그림 4>에서는 제안된 송신 설계로부터 각각의 사용자의 데이터는 우선 OOK 변조기 또는 BPSK 변조기에 의해 변조된 후 OOC와 같은 사용자 특정 광 확산 시퀀스에 의해서 확산된다. 광 확산 시퀀스는



<그림 4> OOK-CDMA의 수신기 부분  
<Fig. 4> Receiver part for OOK-CDMA

백색 LED를 통해 채널에서 데이터와 매치되어 각각의 데이터에 고유의 부호어를 부여한다. 여러 데이터는 하나의 광 네트워크를 동시에 사용함으로써 좋은 성질의 자기상관 및 상호상관을 제공한다.

IM-DD를 이용하여 광 변조함과 동시에 확산 영역에서 DS-SS(Direct Sequence-Spread Spectrum)이 적용된다. 수신기에서 PD는 광 신호를 전기신호로 변환한다. 광 정합필터와 샘플링은 사용자에게 의해서 요구된 광 시퀀스의 확산을 이용하여 수행된다. 마지막으로 OOK 복조기를 통해서 데이터는 복구된다.

#### IV. 시스템 모델의 성능 실험 및 분석

본 장에서는 앞에서 언급된 일반적인 가시 광통신과 제안 시스템인 OOC 매개 변수를 이용한 OOK-CDMA 통신 시스템의 성능에 관한 실험 결과를 제시하고

<표 1> 가시광 통신 시뮬레이션 파라미터  
<Table 1> Parameters for visible light communication

Primary modulation	OOK-NRZ, BPSK
Optical modulation	IM / DD
O/E conv. efficiency	0.53A/W
Optical Channel Model	Directed LOS (Only AWGN) Gfeller and Bapst Model
Background light noise (assumed to be an AWGN)	0.0dBm 1.0mW
Distance between Tx and Rx	5m

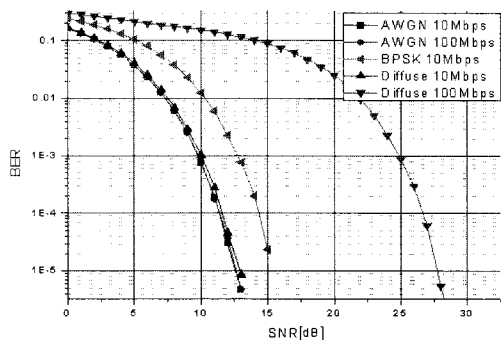
<표 2> OOK-CDMA VLC 시뮬레이션 파라미터  
<Table 2> Parameters for OOK-CDMA VLC

Primary modulation	OOK-NRZ, BPSK
Optical modulation	IM / DD
Spreading Code	Optical Orthogonal code (32,4,1,1)
Original Data Rate	10Mbps
O/E conv. efficiency	0.53A/W
Optical Channel Model	Directed LOS (Only AWGN) Gfeller and Bapst Model
Background light noise (assumed to be an AWGN)	0.0dBm 1.0mW
Distance between Tx and Rx	5m

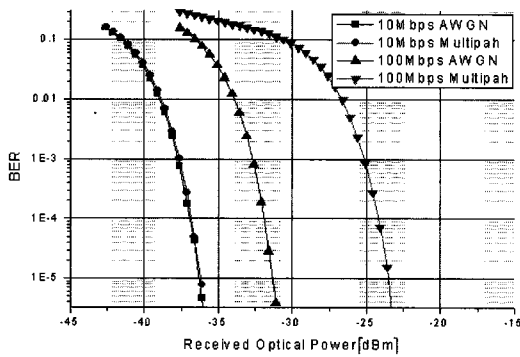
이에 대한 분석을 수행한다. <표 1>과 <표 2>는 본 논문에서 성능 분석을 위해 가정한 파라메타이다.

<그림 5>는 데이터 전송 속도가 10Mbps와 100Mbps일 때의 OOK-NRZ를 이용한 VLC의 BER 대 SNR의 성능 비교를 보여준다. <그림 5>는 2절에서 설명한 실내 채널환경을 조성하기 위해 Gfeller와 Bapst Diffuse 채널을 가정한다. OOK와 IM-DD는 각각 기본 변조 방식과 광 변조 방식으로 사용된다. 이 시스템은 IM-DD 방식을 채택하고 있기 때문에 반송파의 파장에 의존하지 않는 오류특성을 가진다. 광 송신에서의 잡음은 AWGN인 것으로 가정하였고, 전력은 0.0dBm이다. PD의 변환 효율O/E는 0.53A/W이고, Diffuse 채널 모델 가정하였기 때문에 송신기와 수신기 사이의 거리는 5m로 하였다. 그리고 Diffuse 채널 모델 확산 시퀀스는 광 코드(32,4,1,1)로 구성된 시퀀스(0, 1)집합으로 가정한다. AWGN 채널에서 10Mbps에서의 OOK-NRZ를 이용한 VLC는 SNR이 13.6dB일 때, 약  $10^{-5}$ 의 비트 오류를 만족한다. 그러나 이 광 채널은 Non-Directed LOS이기 때문에 경로가 다른 신호 사이의 ISI에 의한 제약이 작다. 그래서 100Mbps에서 BER 성능과 10Mbps에서의 성능의 차이가 거의 없음을 볼 수 있다.

Diffuse Link를 적용한 OOK-NRZ VLC의 BER 성능은 Diffuse Link를 적용하지 않은 OOK-NRZ VLC와 10Mbps에서는 거의 차이를 보이지 않지만 100Mbps에서는 데이터 전송 속도가 커지면서 큰 성능 열화를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이것은



<그림 5> OOK-NRZ와 BPSK를 이용한 VLC의 BER 대 SNR  
<Fig. 5> BER vs. SNR of VLC using OOK-NRZ and BPSK



<그림 6> OOK-NRZ의 BER 대 수신 광 전력  
<Fig. 6> BER vs. received optical power; OOK-NRZ

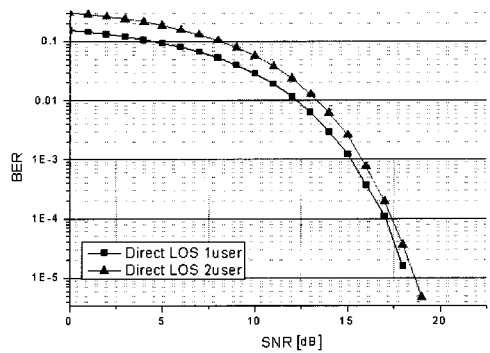
Diffuse Link의 경우 수용량이 크지 않기 때문에 데이터 전송속도가 높아지자 경로가 다른 신호들 사이에서 ISI의 제약이 커져 성능 열화를 보이게 되는 것이다.

또한 OOK-NRZ는 전송대역을 유효하게 이용할 수 있을 뿐만 아니라, OOK-NRZ의 보호구간은 다중 LED에 의해서 발생한 ISI를 흡수할 수 있기 때문에 가시광 통신에 더 효율적이다. 이러한 이유로 OOK-NRZ는 10Mbps에서 OOK-NRZ VLC의 BER 성능이 BPSK의 BER 성능보다 더 우수하다는 것을 보여줌으로써 10Mbps에서는 OOK-NRZ를 이용한 VLC가 BPSK를 사용했을 때보다 효율적인 통신 시스템이라는 것을 확인할 수 있다.

<그림 6>은 데이터 전송 속도가 10Mbps와 100Mbps일 때의 OOK-NRZ를 이용한 VLC의 BER 대 수신 광 전력 성능 비교를 보여준다. <그림 6>의 채널 환경, 변조 방식 검출 방식, 전력, 변환 효율 등은 <그림 5>와 같다고 가정한다.

<그림 6>에서는 기본 데이터 전송 속도가 10Mbps일 때, BER는 성능은 AWGN과 다중 경로 환경에서 거의 차이가 없다. 10Mbps에서는 다중경로 환경이 크게 영향을 미치지 않기 때문이다. 그러나 기본 데이터 전송 속도가 100Mbps일 때는 다중경로환경의 수신 광 전력에 대한 BER이 AWGN 환경에서보다 더 크다는 것을 확인함으로써 다중경로에 의한 간섭 해결의 중요성을 보여준다.

<그림 7>에서의 시뮬레이션 결과는 제안 시스템의



<그림 7> OOC를 이용한 OOK-CDMA BER 대 SNR  
<Fig. 7> BER vs. SNR; OOK-CDMA using OOC

BER 성능을 보여준다. LOS Link는 전력 효율을 최대 화시킬 뿐만 아니라 다중 경로 왜곡을 최소화시킨다. 또한 Diffuse Link와 비교하였을 때 Diffuse Link에 비해 훨씬 더 많은 수용량을 갖기 때문에 더 효율적인 환경을 제공한다. OOC는 좋은 성질의 자기 상관관계와 상호 상관관계를 지니며, ISI를 간섭을 제거함으로써 시스템의 용량을 증가시킨다. <그림 7>에서 SNR이 증가할수록 Direct LOS 1user와 2user의 BER 차이가 적어지는 것을 확인함으로써 OOC를 이용한 OOK-CDMA는 Directed LOS의 사용자의 수가 증가하더라도 SNR이 큰 값을 가진다면 효율적인 시스템이라는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

VLC 시스템은 듀얼기능, 조명, 그리고 백색 LED의 데이터 전송을 이용한 새로운 시스템이다.

본 논문에서는 OOK-NRZ를 이용한 VLC 시스템과 BPSK를 이용한 VLC를 비교 분석함으로써 OOK-NRZ 시스템의 효율성을 검증하였으며, 다중경로환경일 때가 AWGN 환경일 때보다 BER이 더 크다는 것을 확인함으로써 다중경로에 의한 간섭의 해결이 중요하다는 것을 보였다. 마지막으로 LOS 경로에서의 OOC를 적용한 OOK-CDMA를 실험함으로써 다중 접속에서의 VLC시스템의 성능 향상을 위한 변조 방식과 OOC를 이용한 CDMA의 성능 향상을 검증하였다.

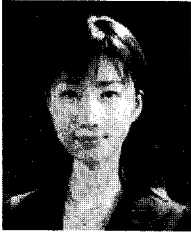
본 제안 시스템은 다른 사용자와 채널 잡음으로 인해 발생하는 빛의 간섭을 쉽게 줄일 수 있게 해주기 때문에 사용자의 수를 늘려 시스템의 성능을 향상시킨다. 백색 LED는 듀얼 기능과 OOC를 도입한 OOK-CDMA 방식을 가지며, 홈 네트워크 서비스는 이러한 백색 LED를 이용한 VLC 시스템을 제공한다.

향후 연구로는 무선 광 채널, 지연확산(Delay Spreading)의 효과, 등화 방식(Equalizing Method), 그리고 소스 코딩(Source Coding)에 대한 연구가 요구되어진다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. Nakagawa, "Wireless home link," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E82-B, no. 12, pp. 1893-1986, Dec. 1999.
- [2] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Indoor visible light transmission system utilizing white LED lights," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E86-B, no. 8, pp. 2440-2454, Aug. 2003.
- [3] J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications," *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265-298, Feb. 1997.
- [4] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting," *Proc. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, and Mobile Radio Comm.*, vol. 2, F81-85, Oct. 2001.
- [5] J. R. Barry, *Wireless Infrared Communications*, Kluwer Academic Press, Boston, MA, 1994.
- [6] F. R. Gfeller and U. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation," *Proc. IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1474-1486, Nov. 1979.
- [7] T. Komine and M. Nakagawa, "Performance evaluation of visible-light wireless communication system using white LED lightings," *IEEE Proc.* vol. 1, pp. 258-263, July 2004.
- [8] F. R. K. Chung, J. A. Salehi, and V. K. Wei, "Optical orthogonal codes: design, analysis, and applications," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 35, no. 3, pp. 595-604, May 1989.

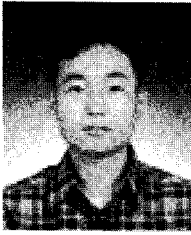
저자소개



배 수 진 (Bae, Su-Jin)

2007년 : 경희대학교 전자공학과 공학사 (전자공학전공)

2008년 ~ : 경희대학교 전자·전파공학과 공학석사과정 (전자·전파공학전공)



홍 영 조 (Hong, Yeong-Jo)

2004년 : 경희대학교 전자공학과 공학사 (전자공학전공)

2006년 : 경희대학교 전파통신공학과 공학석사 (전파통신공학전공)



이 계 산 (Lee, Kye-San)

2002년 : 게이오대학교 전자공학과 공학박사 (정보통신(무선통신)전공)

2002년 ~ 2003년 : 일본 KDDI 연구원

2003년 ~ 2003년 : 일본 게이오대학 교수

2003년 ~ : 경희대학교 전파공학과 교수