

# 전치왜곡을 이용한 OFDM 가시광통신 시스템의 성능개선에 관한 연구

준회원 이대천\*, 최경묵\*, 종신회원 박영일\*

## A Study on the Performance Enhancement of OFDM-Based VLC System by Using Predistortion

Daechun Lee\*, Kyungmook Choi\* Associate Members, Youngil Park\* Lifelong Member

### 요 약

OFDM 변조 방식을 VLC에 사용하는데 있어서 LED의 비선형성은 성능의 저하에 큰 영향을 미친다. 이를 보상하기 위해 전치왜곡을 적용함으로써 LED 출력의 선형성을 보장한다면 큰 변조신호를 LED에 가할 수 있으며, 결과적으로 VLC의 성능을 향상시킬 것이다. 본 논문에서는 LED의 비선형성을 주기적으로 측정하여 전치왜곡 함수를 찾고, 또 이를 적용하여 QAM 기반 OFDM 전송시험을 한 결과를 설명한다.

**Key Words** : VLC (Visible Light Communication), LED, OFDM, PREDISTORTION

### ABSTRACT

In a visible light communication (VLC) system using LEDs, its nonlinearity degrades the performance. If it is compensated by using predistortion and LED's linear range is extended, then a large signal can be used as an LED input and the performance of VLC will be improved. In this paper, a predistortion curve is made by periodic measurement of LED nonlinearity, and the experimental results of predistorted OFDM is provided.

### I. 서 론

OFDM 변조 방식은 직교 주파수를 이용하여 심벌 간 간섭을 최소화하는 다중화 방식으로 각종 통신시스템에서 대역폭 효율을 높이는 방법으로 이용되고 있다. LED를 이용한 가시광통신 (VLC: Visible Light Communication)에 OFDM을 이용할 경우 좁은 주파수영역을 갖는 VLC의 전송 효율을 증대시키고, 부반송파마다 다른 변조기법을 사용할 수 있다. 또한 펄스 변조에 비해 태양광이나 주변 광원의 잡음과 간섭을 극복하기에 매우 유리하다. 또한 IFFT와 FFT를 이용한 디지털회로로 OFDM의 구현이 쉬운 것도 강점이

다. 하지만 OFDM 변조 방식을 VLC에 적용할 경우 LED의 비선형성은 전송 효율에 제약이 된다[1,2]. LED 비선형성은 LED 소자 내에서 정공과 전자가 재결합하는 능동영역의 온도가 전류의 증가에 따라 상승하고 이로 인해 비발광(non-radiative) 재결합 비율이 증가하기 때문에 발생하는 것으로 알려져 있다. LED의 비선형성에 의해 광세기는 인가된 전압에 대해 비선형적으로 출력된다. 결과적으로 이는 LED의 입력신호 크기에 제한을 준다. 입력신호가 선형 영역을 벗어날 경우 출력된 신호는 비선형성을 가져 송신신호를 왜곡함으로써 전송 오류를 크게 한다.

본 논문에서는 전치왜곡을 적용하여 LED의 비선

※ 본 연구는 한국연구재단 중견연구지원사업(2010-0027595) 및 방송통신위원회/한국방송통신전파진흥원 방송통신기술개발사업(11911-01111)의 지원으로 수행되었음.

\* 국민대학교 전자공학부 광대역통신 연구실 (ypark@kookmin.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-03-148, 접수일자 : 2011년 3월 15일, 최종논문접수일자 : 2011년 5월 23일

형성을 보상함으로써 가시광통신의 성능을 개선하는 것을 제안하며, 시뮬레이션뿐 아니라 FPGA에 전치왜곡을 이용한 OFDM 전송시스템 테스트베드를 제작하여 실험을 한 결과를 보인다. 송신부에서는 LED의 비선형성을 실시간으로 측정하여 왜곡 특성을 파악하고, 이를 이용하여 전치왜곡에 필요한 역함수를 계산한다. 이때 필요한 샘플링 과정과 IFFT/FFT의 구성 등 테스트베드의 전반적인 구현에 대한 기술 및 그 결과를 다음 절들에서 설명한다.

## II. 전치왜곡 OFDM 가시광통신 시스템

LED의 비선형성을 살펴보기 위해 인가전압을 변화하며 출력 광세기를 측정했더니 그림 1과 같은 관계를 볼 수 있었다. 측정에는 두 개의 백색 LED (KWT728-S)를 사용하였으며, LED 전면에 PD를 두고 이곳에서 검출된 전압을 출력 광세기 대신 이용하였다. 그림에서와 같이 LED에 따라 출력 크기에는 차이가 있었지만 비선형 특성은 매우 유사하게 관찰되었다. 한편, OFDM 변조지수를 극대화해서 전송성능을 높이기 위해서는 입력전압의 선형성이 보장된 가능한 넓은 영역을 변조에 활용하는 것이 필요하며, 본 연구에서는 LED의 특성을 고려한 전치왜곡을 통해 이를 구현하였다.

전치왜곡을 이용한 OFDM 기반 가시광통신 송수신부를 그림 2와 같이 구성한다. 여기에서 송신 데이터는 N-QAM 변조 후에 IFFT를 거치면서 서로 직교하는 주파수 성분들로 표현된다. IFFT 출력 신호는 LED 변조에 이용되는데, 이때 LED의 비선형성으로 인해 IFFT 출력 신호가 LED 출력으로 제대로 전달되지 못하고 왜곡이 발생한다. 왜곡된 신호는 잡음에 취

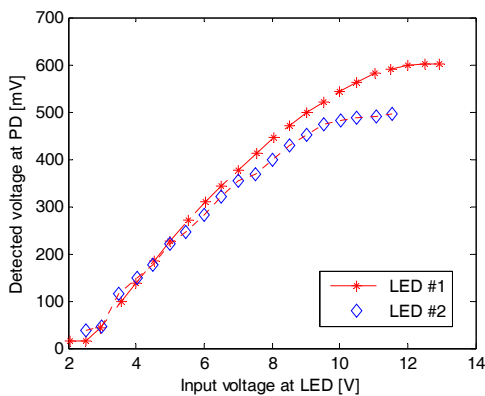


그림 1. LED의 비선형성 측정<sup>[3]</sup>

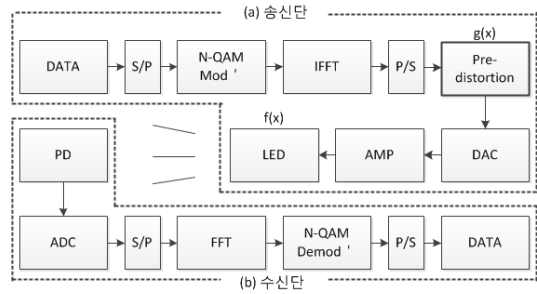


그림 2. 전치왜곡을 적용한 OFDM 송수신 블록도

약하고 주파수 성분 간 직교성을 손상하므로, 수신부에서 FFT와 N-QAM 복조기를 통해 복구된 신호에서는 오류가 발생한다. 이를 보상하기 위해 그림 2(a)와 같이 송신부의 DAC 전단에 전치왜곡기를 이용하였다.

그림 3에서는 LED의 비선형성 및 전치왜곡 함수를 보이고 있다. 전치왜곡 함수  $g(x)$ 는 LED 특성함수  $f(x)$ 의 역함수로 얻어지며, 이를 실시간으로 얻기 위해서는 주기적으로  $f(x)$ 를 샘플링해야 한다.

그림 4에서는 등 간격으로 이루어진 다수 개의 입력 전압을 LED에 인가하여 LED의 특성을 측정할 후, 그 사이 구간은 선형을 가정하고 역함수를 계산하는 과정을 보이고 있다. 등 간격을 갖는  $q+1$ 개의 입력 값  $a_0, a_1, \dots, a_q$ 에서 LED 출력을  $b_0, b_1, \dots, b_q$ 이라고 가정하자. 이 때  $k$ 번째 구간에서의 LED 특성함수와 이의 역함수는 각각 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = m \cdot x + n \quad (a_{k-1} \leq x \leq a_k) \quad (1)$$

$$g(x) = \frac{x-n}{m} \quad (b_{k-1} \leq x \leq b_k) \quad (2)$$

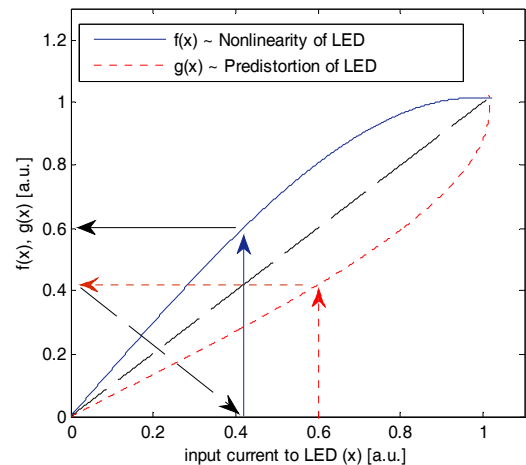


그림 3. LED의 특성함수와 그의 역함수<sup>[3]</sup>

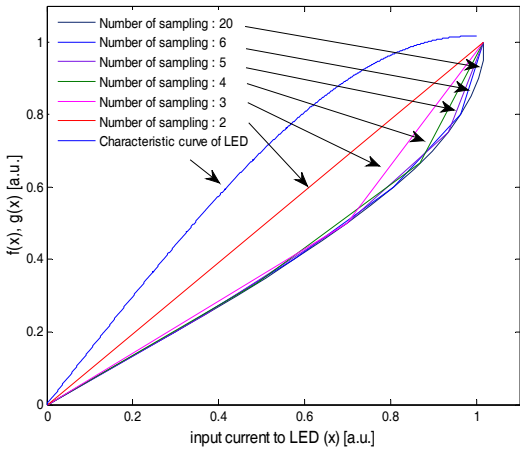


그림 4. 샘플링 개수에 따른 역함수

$$m = \frac{b_k - b_{k-1}}{a_k - a_{k-1}} \quad (3)$$

$$n = -m \cdot a_k + b_k \quad (4)$$

위 역함수 계산 과정에서 샘플링 포인트의 개수가 증가할수록 유추 역함수는 실제 역함수와 근접하게 된다. 또한 FPGA에서 역함수 계산은 특정 개수만큼 샘플링 한 데이터를 Floating-point를 사용하여 수학적으로 연산하는 과정이므로 데이터를 송신할 때마다 이 과정을 되풀이 하는 것은 많은 부하와 지연을 발생하게 한다. 따라서 전치왜곡부에서는 각 입력 값에 대응하는 역함수 값을 데이터베이스화하여 저장하고, IFFT 블록에서 데이터 발생 시 해당 데이터를 찾아서 출력할 수 있도록 한다.

### III. 전치왜곡에 따른 OFDM 성능 분석

이번 절에서는 위 그림 2에서 보인 구성과 같이 N-QAM 변조와 OFDM을 적용한 가시광통신 시스템을 구현하고, 전치왜곡을 적용하여 LED의 비선형성을 개선할 경우에 가능한 성능 향상을 분석하였다.

LED의 비선형성을 보상하기 전후의 비트오율을 임의의 데이터를 생성하여 측정하였다. 이때 LED의 비선형성으로는 그림 1의 측정결과를 사용하였다. N-QAM 변조의 비트오율 성능계산에는 식 (5)를 사용하였고<sup>[4]</sup>, 16-QAM과 64-QAM의 결과 값을 그림 5에 나타냈다. IFFT와 FFT에는 64개의 부반송파를 사용하였다.

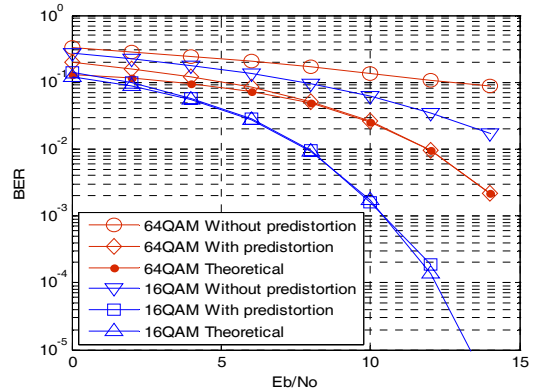


그림 5. 전치왜곡 적용 전후의 N-QAM 성능비교

$$P_G(\gamma) = a \cdot \text{erfc}(\sqrt{b\gamma}) - c \cdot \text{erfc}^2(\sqrt{b\gamma}) \approx a \cdot \text{erfc}(\sqrt{b\gamma}) \quad (5)$$

$$\begin{cases} a = 3/8, b = 2/5, c = 9/64 & \text{for } 16\text{-QAM} \\ a = 7/24, b = 1/7, c = 49/384 & \text{for } 64\text{-QAM} \end{cases}$$

QAM의 차수가 클수록 심볼간 격차가 작아지므로 비트오율의 성능 저하가 더 크게 나타난다. 전치왜곡이 적용되지 않는 곡선은 비트오율의 성능 저하를 보여주나 이상적으로 전치왜곡이 적용된 곡선의 경우 이론적인 비트오율 곡선과 거의 일치함을 볼 수 있다<sup>[3]</sup>.

전치왜곡 함수 계산에 이용한 샘플 값 개수에 따른 OFDM 비트오율의 계산 값을 그림 6에 나타냈다. 이때 IFFT 부반송파는 64개이고 16-QAM 변조를 가정하였다. DAC가 출력할 수 있는 최대 신호 값과 최저 신호 값만 샘플링 값으로 하는 경우에는 전치왜곡부 전후의 입력과 출력이 같아 LED의 왜곡을 반영하지 못한다. 샘플링 개수를 3개 이상으로 하여 전치왜곡 함수를 구하는 경우 비트오율 성능은 급격하게 개선

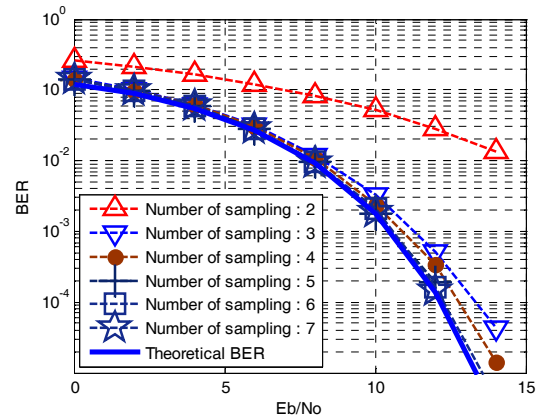


그림 6. 전치왜곡 샘플링 개수에 따른 비트오율

되며, 5개 이상 샘플링을 하는 경우 거의 이론적인 비트오율곡선에 근접하는 것을 볼 수 있다.

#### IV. 테스트베드 구성 및 시험 결과

위에서 설명한 전치왜곡 과정을 LED에 적용하여 OFDM 기반 가시광통신의 테스트베드를 구성하고 성능을 시험하였다. 전체적인 송수신부의 구성은 그림 2와 같다. IFFT와 FFT에는 각각 64개의 부반송파를 사용하였고, 신호의 변조에는 16-QAM을 사용하였다. LED 비선형성 측정을 위한 샘플링 개수는 5개를 이용하였다. LED의 왜곡 정도를 측정하고 이로부터 역함수를 유도해 데이터베이스화 한다. 이 실험을 위해서 Xilinx사의 Spartan-6 FPGA 보드가 사용되었다.

OFDM의 송신부를 구성하는 IFFT의 연산 결과는 실수부와 허수부로 표현되는데 실수부만이 LED의 입력 값으로 이용되기 때문에 허수부를 0으로 만들어 주어야 한다. 이를 위해서 IFFT의 입력 데이터 프레임은 그림 7과 같이 DC성분은 0이 되어야하고 이를 제외한 나머지 부분은 중심을 기준으로 켈레복소수 대칭을 이루어야 한다<sup>5)</sup>.

그림 8은 전치왜곡이 적용되기 전의 LED 출력과 연산과정 후 전치 왜곡이 반영된 이후의 출력을 함께 보이고 있다. 명확한 비교를 위해 LED가 표현할 수 있는 최저점에서 최고점까지의 신호를 출력하고 이를 PD에서 측정한 화면이다. 전치왜곡 과정을 통해 LED의 비선형성이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

IFFT에 의해 변조된 신호가 전치왜곡단과 LED를 거쳐 전송된 후 PD에서 수신된 신호를 그림 9(a)에



그림 7. IFFT 입력 데이터 프레임 구성

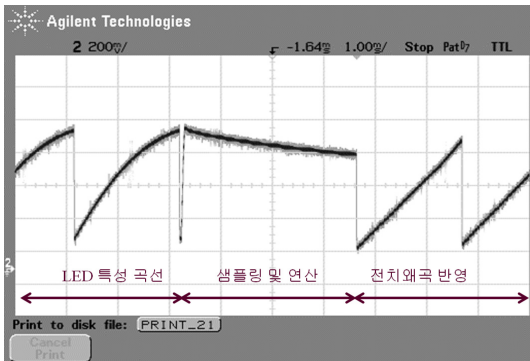


그림 8. 전치왜곡 적용 전후 LED 출력 신호

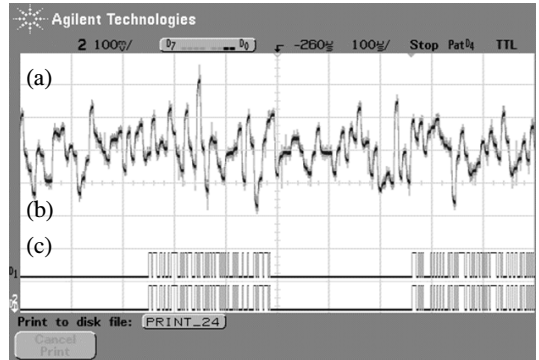


그림 9. (a) PD에 수신된 OFDM 신호 (b) 송신 데이터 (c) 수신 데이터

보인다. 그림 9(b)의 송신 데이터와 그림 9(c)의 수신 부 복구 데이터를 비교할 때 신호가 오류 없이 잘 전송된 것을 확인할 수 있었다.

또한 측정지점의 조도와 비트오율의 관계를 전치왜곡 적용 전과 적용 후에 각각 측정하여 그림 10에 나타냈다. 조도는 광원으로부터 거리의 제곱에 반비례하며, 조도가 높아질수록 비트오율 성능은 개선되어야 한다. 그런데 그림 10에서와 같이 전치왜곡을 적용하지 않는 경우 조도가 커지면서 비선형성도 커져서 BER floor가 발생하는 반면, 전치왜곡을 적용하면 BER 성능이 조도에 따라 거의 선형적으로 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

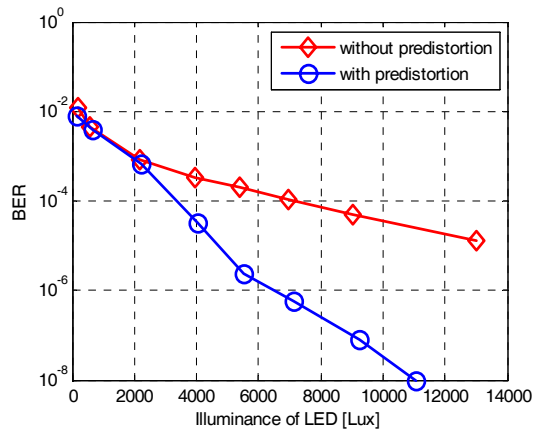


그림 10. 조도에 따른 비트오율

#### V. 결론

본 연구를 통해 OFDM을 적용하는 가시광통신에서 전치왜곡의 필요성을 살펴보았다. 전치왜곡은 LED 특성에 의한 비선형성을 극복하게 함으로써 통

신성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 OFDM 기반 가시광통신에서 전치왜곡 적용의 구현방법과 이의 성능을 측정한 결과를 제시하였다. 제안된 방식은 향후 가시광통신의 대역폭 이용효율을 개선하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas, "Predistortion in Optical Wireless Transmission Using OFDM", International Conf. on Hybrid Intelligent Systems, pp.184-189, 2009.
- [2] K. ASATANI and T. KIMURA, "Linearization of LED Nonlinearity by Predistortions, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.13, Issue 1, pp.133-138, 1978.
- [3] 이대천, 여은모, 김재성, 박영일, "전치왜곡을 이용한 OFDM 가시광 통신 시스템의 성능 개선", 2010 광자기술학술회의, pp.402-403, 2010.12.2.
- [4] S. Sampei, *Applications of digital wireless technologies to global wireless communications*, Prentice Hall, 1997.
- [5] M. Afgani, H. Haas, H. Elgala, and D. Knipp, "Visible Light Communication using OFDM", Conf. on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, pp.129-134, 2006.

최 경 목 (Kyungmook Choi)

준회원



2011년 국민대학교 공학사  
2010년~현재 국민대학교 대학  
원 전자공학과 석사과정  
<관심분야> 가시광통신, 광대  
역 통합망, 무선네트워크

박 영 일 (Youngil Park)

중신회원



1987년 서울대학교 공학사  
1989년 서울대학교 공학석사  
1995년 Texas A&M Univ. 공  
학박사  
1995년~1999년 KT 연구개발  
본부 선임연구원  
1999년~현재 국민대학교 전자  
공학부 부교수

<관심분야> 광가입자망, 가시광통신, 광대역 통합망

이 대 천 (Daechun Lee)

준회원



2006년 국민대학교 공학사  
2006년~2007년 삼성전자 무선  
사업부 연구원  
2010년~현재 국민대학교 대학  
원 전자공학과 석사과정  
<관심분야> 광대역 통합망, 무  
선네트워크, 네트워크 보안