

## 저압 전력선 채널 특성을 고려한 OFDM변조 전송

강덕하\*/허윤석\*\*/조기형\*\*\*/이대영\*\*\*\*

### 요 약

본 연구는 최근 새로운 통신 방식으로 제안되고 있는 저압 전력선 통신에 대해서 검토한다. 저압 전력선 통신을 위한 지연, 감쇠, 주파수 선택적 페이딩의 특성을 갖는 전력선채널의 모델링과 함께 이 채널 특성에 다중 반송파 변조의 일종인 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)방식을 적용해 봄으로써 전력선 통신에 OFDM변조 방식이 적합한지 분석한다.

### 1. 서론

전력선통신(Power line communication; PLC)은 전력 공급을 목적으로 하는 전력선을 이용하여 통신하는 것을 말한다. 지금의 고속·광대역 인터넷 서비스의 보급은 유선의 경우 xDSL(Digital Subscriber Line), 케이블망 등이 이용되고 있으며 무선의 경우 B-WLL(Broadband Wireless Local Loop)등이 이용되고 있으나, 이러한 방법은 새로운 망 구축비용이 적은 대도시 지역을 중심으로 서비스가 치중되어 있는 현실이다. 특히 농어촌 및 산간 오지 등과 같이 동축케이블이나 광케이블의 포설이 용이하지 않은 지역에서는 기존의 완벽한 전력선 인프라를 사용하여 광대역 액세스망을 구축하는 방안이 매우 효과적이며 최적의 솔루션이 될 것으로 예상된다. 전력선을 통신 매체로 이용하면 매우 경

제적으로 네트워크를 구축할 수 있는데 그 이유는 이미 모든 건물이나 시설에 전력선이 설치되어 새로운 통신 회선의 설치가 필요 없기 때문이며, 집안 어느 전원 콘센트에서도 통신이 가능하기 때문에 매우 편리하다. 또한 무선통신에서는 매우 높은 주파수를 사용하나 전력선을 이용한 통신에서는 수백kHz에서 수십MHz의 반송파를 사용하여 신호를 전송할 수 있는 장점이 있다.

그러나 전력선은 주파수 60Hz의 전력을 공급하는 것을 목적으로 하기 때문에 주파수가 낮아 선로의 특성 임피던스나 감쇠상수, 위상상수 등 선로의 전파상수와 같은 선로정수가 규정되어 있지 않다. 부분적으로 선로정수가 같지 않은 선로를 사용하기 때문에 높은 주파수 신호를 전송하고자 하는 경우에는 이들 모두를 고려해야 한다. 그리고 각 가정 또는 산업 현장마다 전력을 사용하는 모든 곳에서 부하가 다르기 때문에 신호를 전송하고자 할 때는 임피던스 부정합이 생겨 반사파가 발생하고 감쇠가 발생한다. 또한 선로상수가 불규칙적으로 변동하게 되어 주파수에 대한 선택적 페이딩이 발생하게 된다. 그리

\* 충북대학교 정보통신공학과  
\*\* 충청대학 전자정보과 조교수  
\*\*\* 충북대학교 정보통신공학과 교수  
\*\*\*\* 경희대학교 전자정보학부 교수

고 각종 전기·전자 기기로부터 발생하는 불필요한 전자파가 전력선에 유입되어 잡음 특성을 가지게 된다.[1,2]

그러므로 전력선을 이용한 통신에서는 이러한 장애를 극복할 수 있는 통신 방법이 요구된다. 즉 잡음에 대한 영향이 적고 협대역으로 이웃간 간섭이 적으며 다른 기기에 대한 고주파의 영향을 최소화 할 수 있는 통신 기술이 요구된다. 그중 병렬 대역 확산기법인 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)에 관심이 집중되었다.

OFDM이란 다중 반송파를 사용하여 데이터를 전송하는 방법으로 다수의 직교반송파를 사용함으로써 주파수 효율적인 전송이 가능하다. 최근 차세대 이동통신을 위한 후보기술로서 적극 검토, 연구되고 있으며 현재 DAB, DVB등의 방송 시스템과 WLAN등의 고속데이터 통신시스템에 사용되고 있다.[5]

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 전력선 채널에 대한 특성을 II장에서 살펴보고 다음으로 III장에서는 OFDM시스템의 특성에 대해서 알아본다. IV장에서는 모의 실험을 통하여 전력선 채널환경에 OFDM을 적용하였을 때의 성능을 검증하고 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 전력선 채널 모델

전력선 통신에서 사용되는 전송 매체는 전력선이다. 이 전력선은 기본적으로 데이터 전송용으로 설계된 것이 아니며 단순히 전력 전달에 대해 최적화되어 설계된 것이기 때문에 전송용으로 사용될 경우 다양한 잡음 특성과 감쇠 현상 등이 나타난다. 또 전력선 토폴로지(topology)

와 부하의 변화에 따라 전달 특성의 변화도 심하다.[1,2,3]

표 1은 전력선의 잡음 및 간섭의 종류와 해결 방안을 정리한 것이다.

<표 1> 전력선 채널 잡음과 해결 방안

잡음종류	해결 방안
배경잡음	· FEC(Forward Error Control)부호와 Interleaving
협대역 잡음	· FEC부호와 주파수 다이버시티 결합 · 협대역 잡음대역에 Zero padding비트 할당 · 간섭제거기 사용
임펄스 잡음	· FEC 부호와 Interleaving · 적응형 필터 이용
고조파 잡음	· 고조파 잡음의 주파수에 해당하는 null을 갖는 필터 사용 · FEC 부호와 Interleaving

본 연구에서 고려하는 전력선 채널의 일반화된 전달 함수는 다중 경로 전파와 주파수와 길이에 의존하는 감쇠를 고려한 식(1)과 같다. [1]

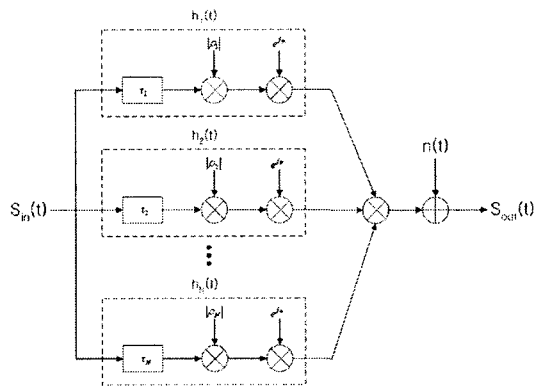
$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-(a_0+a_1 f^k)d_i} \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

식(1)은 세 부분의 요소 항이 존재함을 알 수 있다. 전력선 길이와 사용 주파수 의존 항인 지연 감쇠 요소항 ( $g_i$ )와 사용 전력선의 종류에 따른  $C, R, L, G$  로 구성되는 감쇠 계수의 항 ( $e^{-(a_0+a_1 f^k)d_i}$ ), 신호 경로의 길이와 위상 속도로 구성되는 지연 항 ( $e^{-j2\pi f \tau_i}$ )으로 구분할 수 있다. 표 2는 식(1)에서 사용한 파라미터에 대한 설명이다.

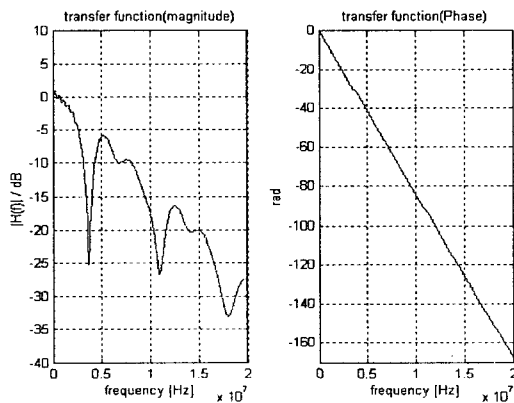
(그림 1)은 N개의 다중 경로를 가지며 노이즈 성분이 고려된 전력선 채널의 전달함수 모델이다.

<표 2> 전달함수의 모델 파라미터

$N$	신호 경로의 경우 수
$i$	경로의 수
$a_0, a_1$	감쇠 요소
$g_i$	경로 $i$ 의 가중 요소
$k$	감쇠 요소의 지수
$d_i$	경로 $i$ 의 길이
$\tau_i$	경로 $i$ 의 지연



(그림 1) 다중경로와 노이즈를 가지는 전달함수 모델



(그림 2) N=6의 경로를 가지는 전달함수의 특성

(그림 2)는 N=6의 경로를 가지는 식(1)에 근

거한 전력선 채널 모델의 주파수와 위상의 전달 특성을 모의 실험 한 결과이다. 전력선 통신에 사용하는 주파수 범위를 표준화가 진행되고 있는 DC~20MHz에서 행하였다.

모의 실험에 사용한 샘플 신호의 파라미터는 표 3에 정리하였다. 이는 사용 모델의 모든 실질적인 효과를 포함하는 요소들이다.

<표 3> 샘플 네트워크의 모델 파라미터

Path No.	1	2	3	4	5	6
Length[m]	200	221	242	259	266	530
Weighting factor	0.54	0.275	-0.15	0.08	-0.03	-0.02
$k=1$	$a_0 = -2.1E-3$	$a_1 = 8.1E(-10)$	$\tau_f = 6.67E(-9)$			

### III. OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)

OFDM은 주파수 선택적 페이딩(Frequency selective fading)에 강인한 주파수 효율적인 변조방식으로써 고속 전송률(high-rate)의 직렬 신호를 낮은 전송률의 여러 병렬 신호로 분리한 후 이를 각각의 직교 부반송파(sub-carrier)에 변조하여 송·수신함으로써 데이터 전송률을 높이는 방식으로 낮은 전송률을 갖는 부반송파의 심벌구간(symbol duration)이 증가하게 되므로 다중경로 지연확산에 의해 발생하는 시간상에서의 상대적인 신호분산(dispersion)이 감소한다. 모든 OFDM 심벌 사이에 채널의 지연확산보다 긴 보호구간(guard interval)을 삽입하여 심벌간 간섭(Inter-Symbol Interference; ISI)을 제거할

수 있으며, 보호구간에 OFDM신호의 일부를 복사하여 심벌의 시작부분에 배치하면 OFDM 심벌은 순환적으로 확장(cyclically extended)되어 부반송파간 간섭(Inter-Carrier Interference; ICI)을 피할 수 있다.[5] 또한 주파수 분할방식에 비하여 스펙트럼의 효율을 높일 수 있는데 그 이유는 채널의 효율을 극대화하기 위하여 부반송파간 간섭이 발생하지 않도록 직교성(Orthogonality)을 유지하여 부반송파간 중첩을 허용하기 때문이다.[5]

일반적으로 저역통과 등가 OFDM신호를 다음과 같은 변조된 부반송파의 병렬 전송신호로 볼 수 있다.

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot \psi_{n,k}(t) \quad (2)$$

일반적인 통신 시스템에서와 같이 OFDM의 개념적 측면에서는 매우 많은 이상적인 변복조 블록이 필요 하지만 이와 같은 블록의 필요 없이 이산푸리에변환 방법(Discrete Fourier Transform)으로 이를 대신한다.[3,5]

식(2)을 부반송파의 심벌을  $1/T_s$ 보다 높은 샘플링율로 샘플링 한다면 가장 낮은 부반송파 주파수에 대하여  $f_0=0$ 을 가정하면,  $n$ 번째 OFDM 심벌에서의 전송 신호  $F_n(t)$ 의 이산신호  $F_n(m)$ 은 다음과 같다.

$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot \psi_{n,k}(t) \Big|_{t=(n+m/N)T_s}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

즉,

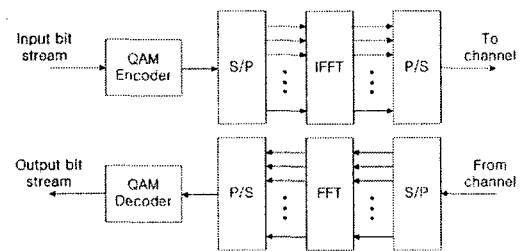
$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi k \frac{m}{N}} = N \cdot \text{IDFT}(C_{n,k}) \quad (4)$$

여기에서  $\text{IDFT}(C_{n,k})$ 는  $C_{n,k}$ 에 대한 역이산 푸리에 변환(Inverse Discrete Fourier Transform)이다.

OFDM의 전송방식은 송신측에서 전송 데이터 열  $C_{n,k}$ 에 대하여 IDFT한 신호를 전송하면 수신측에서는 식(5)과 같이 수신신호에 대하여 DFT함으로써 원래 전송신호  $C_{n,k}$ 를 얻을 수 있다.

$$C_{n,k} = \frac{1}{N} \text{DFT}(F_n(m)) \quad (5)$$

(그림 3)은 일반적인 OFDM송·수신기의 구조이다. 입력 비트 스트림을 QAM방식으로 mapping하고 이것을 병렬로 변환하는데 부반송파의 수만큼 변환된다. 이 데이터들을 IFFT(Invers Fast Fourier Transform)를 거쳐 시간영역으로 변환된다. 이때 각 데이터들은 적당한 부반송파 주파수 값을 갖게 된다. 변환된 데이터는 다시 직렬로 변환되어 송신된다. 수신부에서는 수신된 신호의 부반송파 수만큼 병렬로 변환 후 FFT(Fast Fourier Transform)처리 후 직렬로 변화하고 demapping하여 원 데이터를 수신하게 된다.



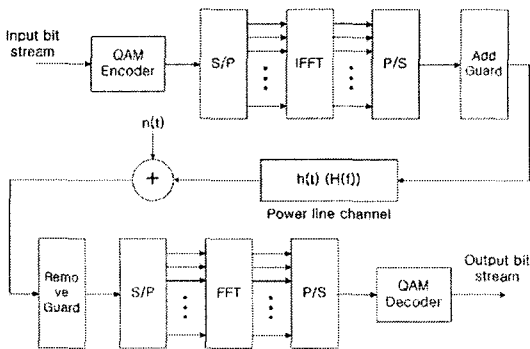
(그림 3) OFDM송·수신기 기본적인 구조

### IV. 모의 실험 결과

본 장에서는 II장에서 고려한 전력선 채널 특성에 OFDM을 적용하여 모의 실험을 수행하고 그 결과를 분석한다. 모의 실험에 이용된 전력선 채널은 II장에서 검토한 채널 특성을 이용하였다. 6개의 다중 경로를 가지며 노이즈성분을 포함하는 것으로 주파수범위는 DC~20MHz이다. 채널 특성에는 표피 효과를 고려한 전력선 채널, AWGN을 모델링하여 송신 신호에 대한 수신신호의 잡음 특성을 실험하고 그에 따른 파라미터를 표 4에 정리하였다. 그림 4는 전체적인 시스템의 블럭도이다.

<표 4> 모의 실험에 사용된 파라미터

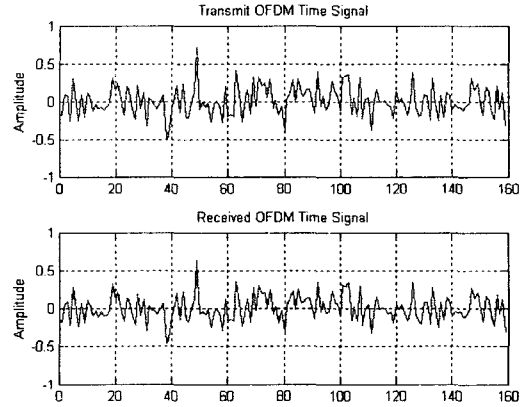
주파수 대역폭	DC ~ 20MHz
부반송파수	128
부반송파 간격	156.25kHz
OFDM 실제 심벌 구간	6.4μs
Cyclic Prefix	1.6μs
OFDM 전체 심벌 구간	6.4μs + 1.6μs = 8μs
변조방식	16-QAM



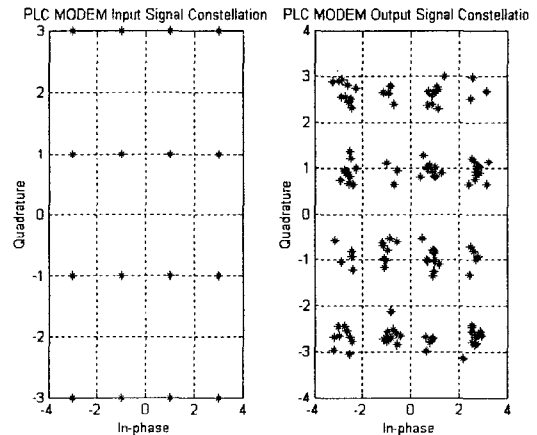
(그림 4). 모의실험에 이용된 블럭도

(그림 5, 6)은 전력선 채널을 적용한 OFDM 송·수신 결과로 (그림 5)는 송·수신 파형으로

Guard Interval이 추가된 형태이다. (그림 6)은 송·수신 데이터의 성상도를 보여준다.



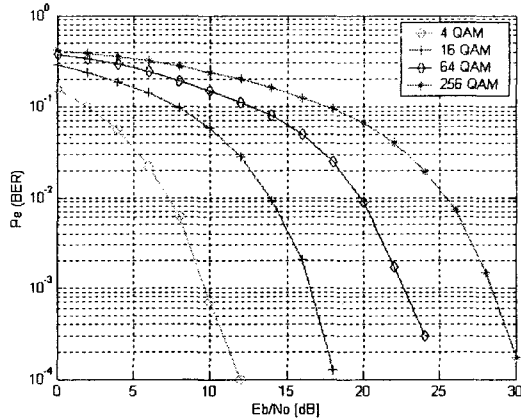
(그림 5) 전력선 채널을 적용한 OFDM 송·수신 파형



(그림 6) 송·수신 데이터의 성상도(16-QAM)

(그림 7)은 디지털 통신의 성능 평가 중요 요소인 신호대 잡음 전력비(SNR)와 비트 에러율(BER)을 QAM변조에서의 비트 할당에 따른 성능을 보여 주고 있다. 에러확률 결과를 보듯이 낮은 비트 할당이 에러율이 낮으나, 데이터 전송에 필요한 통신 채널 사용에서는 불리한 결과를 보여 주는 것으로 M-ray가 짝수인 4, 16, 64,

256-QAM에 대하여 비교하였다.



(그림 7) QAM변조의 비트 에러 확률

## V. 결론

본 논문에서는 전력 공급이 목적인 전력선을 통신 선로로 이용하고자 하는 필요성과 기술적 가능성을 살펴보고, 전력선의 전달함수에 대한 모델링을 모의 실험하여 감쇠와 주파수 선택적 페이딩이 존재하는 것을 확인하였다. 이를 극복하기 위한 강건한 변조 방식으로 OFDM 변조의 기본 이론을 알아보았고, 이를 전력선통신에서 사용될 주파수 대역에서의 지연과 감쇠, 위상 지연 등을 파악하고자 채널에 적용하여 전송 특성을 살펴보았다. 이는 모델링된 전력선에 임의의 데이터를 변조하고 복조 하여 그 비트의 에러 정도를 확인하고자 변복조의 정상도와 비트 오차 확률을 실험하였다.

오차 확률은 정상도의 좌표에 대한 최소 거리 자승 법으로 구하였으며, 전력선 채널에 강인한 변조 비트 할당은 BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM 순으로 채널 잡음에 강인한 것으로 확인

되었다.

향후 연구는 다중 경로 채널 특성으로 인한 주파수 선택적 페이딩 및 잡음 환경에 적합한 적응적 비트 할당 변조 방법과 보상 기법 및 등화 방법, 주파수 영역에서의 채널 추정 방법 등에 연구를 진행하고자 한다.

## 참고 문헌

- [1] K. Dostert, "Powerline Communications", Prentice Hall, 2001.
- [2] M. Zimmermann, K. Dostert, "A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range", in Proceedings of 3rd ISPLC '99, 1999, pp.45~51,
- [3] S. Nomura, T. Nishiyama, M. Itami, K. Itoh, "A Study on Adaptive Carrier Modulation and Transmission Power Control Scheme for OFDM", ISPLC2002, 2002, pp.130~134,
- [4] 강덕하 외, "저압 전력선 통신 변조 기법 및 전력선 채널 특성", 정보학연구 5권 4호, 한국정보기술전략혁신학회, 2002. 12.
- [5] 조용수, "무선 멀티미디어 통신을 위한 OFDM 기초", 대영사, 2000.
- [6] J. G. Proakis, M. Salehi, "Contemporary Communication Systems using MATLAB", Books/Cole, 2000.

## OFDM Modulation Transmission in consideration of Low Voltage Powerline Channel Characters.

Duk-Ha, Kang\*/Yoon-Seok, Heo\*\*/Ki-Hyung, Cho\*\*\*/Dae-Young, Lee\*\*\*\*

### Abstract

This paper is about power line communication(PLC) over the low power voltage grid. The main advantage with power line communication is the use of an existing infrastructure.

The PLC channel can be modeled as having multi-path propagation with frequency-selective fading, typical power lines exhibit signal attenuation increasing with length and frequency.

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is a modulation technique where multiple low data rate carriers are combined by a transmitter to form a composite high data rate transmission.

To implement the multiple carrier scheme using a bank of parallel modulators would not be very efficient in analog hardware. Each carrier in an OFDM is a sinusoid with a frequency that is an integer multiple of a base or fundamental sinusoid frequency. Therefore, each carrier is a like a Fourier series component of the composite signal. In fact, it will be shown later that an OFDM signal is created in the frequency domain, and then transformed into the time domain via the Discrete Fourier Transform(DFT).

---

\* Dept. of Computer and communication Eng., ChungBuk Nat'l Univ.

\*\* Dept. of Electronic Eng., ChungCheong Colledge

\*\*\* Dept. of Computer and communication Eng., ChungBuk Nat'l Univ.

\*\*\*\* Colledge of Electronic Information, KyungHee Univ.

저자 연락처

#강덕하

주소) 충북 청원군 강내면 월곡리 330번지 충청대학 전자정보과

e-mail) dukha@hitel.net

tel) 043-230-2270

fax) 043-230-2279

#허윤석

주소) 충북 청원군 강내면 월곡리 330번지 충청대학 전자정보과

e-mail) hys@ok.ac.kr

tel) 043-230-2274

fax) 043-230-2279