

# 스마트 그리드를 위한 전력선 통신 시스템에서의 데이터 전송률 향상 기법

준희원 김 요 철\*, 배 정 남\*, 정희원 김 윤 현\*, 종신회원 김 진 영\*

## Data Transmission Rate Improvement Scheme in Power Line Communication System for Smart Grid

Yocheol Kim\*, Jung Nam Bae\* Associate Members, Yoon Hyun Kim\* Regular Member,  
Jin Young Kim\*\* Lifelong Member

### 요 약

본 논문은 스마트 그리드를 위한 전력선 통신 시스템에서 데이터 전송률을 향상시키는 적응형 OFDM CP 길이 알고리즘에 대해 연구하였다. 본 논문에서 제안한 기법은 수신단의 CP controller에서 수신된 데이터 프레임과 지연된 동일 데이터 프레임을 상관 처리를 취함으로써 채널 지연 정보를 계산한 후, 즉시 그 정보를 송신단에 피드백 한다. 그 다음, 송신단에서는 다음 데이터 프레임에 대한 CP 길이를 조절하게 된다. Impulsive noise 모델로서, Middleton Class A 간섭 모델을 사용하였고, 성능은 패킷 전송률과 누적 패킷 전송률, 비트 오류율 측면에서 평가되었다. 모의실험 결과로부터 패킷 수가 증가할수록 데이터 이득(감소된 비트 양)이 커지지만, branch 수 ( $N_{br}$ )가 증가할수록 데이터 이득 폭은 감소한다는 것을 알 수 있었다.  $N_{br}$ 이 3, 5, 10인 경우, 적응형 CP 길이 알고리즘과 고정된 CP 길이 기법의 BER 성능은 비슷하였다. 따라서 제안한 기법은 기존의 고정 CP 길이 기법과 비교하여 BER 성능 감소 없이 데이터 전송률 증가를 달성하였음을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : smart grid, power line communication, cyclic prefix, OFDM

### ABSTRACT

In this paper, I propose an adaptive OFDM CP length algorithm for in PLC systems for smart grid. The proposed scheme calculates the channel delay information at the CP controller of the receiver by taking correlation between a received data frame and the following delayed one. The CP controller, immediately, feeds back the channel delay information to the transmitter. Then, the transmitter adapts CP length for next data frame. As an impulsive noise model, Middleton Class A interference model was employed. The performance is evaluated in terms of packet data rate, cumulative packet data rate, and bit error rate (BER). The simulation results showed data gain (which is the amount of the reduced bits) gets larger as the number of packets increase, but the amount of data gain reduced as the number of branches ( $N_{br}$ ) increase. In respects of BER for the cases  $N_{br}$  is 3, 4, and 5, performance of the adaptive CP length algorithm and the fixed CP scheme are similar. Therefore, it is confirmed the proposed scheme achieved data rate increment without BER performance reduction compared to the conventional fixed CP length scheme.

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임 (No.2010-0022629)

\* 광운대학교 전기공학과 유비쿼터스 통신 연구실 (yocheolkim@kw.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-06-247, 접수일자 : 2010년 06월 02일, 최종논문접수일자 : 2010년 11월 30일

## I. 서 론

수년전부터, 전력 산업 및 정부 기관, 대학들은 노후한 전력 인프라를 어떻게 최신식으로 바꿀 것인가에 대해 많은 연구를 해왔다. 진화된 전력망이 증가하는 전력 수요를 보장해야할 뿐만 아니라, 매우 효율적으로 동작해야한다는 것은 이들의 공통된 생각이다. 이러한 생각에서 스마트 그리드가 탄생하게 되었다. 스마트 그리드는 첨단 IT 기술을 접목하여 전력망의 효율성, 신뢰성, 유연성을 향상시키고 추가적인 전기 설비비용을 줄이는 것을 목표로 현재 많은 연구가 진행 중이며, 국가산업의 한 부분으로 그에 대한 관심과 기대 또한 큰 실정이다<sup>1)</sup>.

스마트 그리드 산업에서 통신 분야는 중요한 부분을 차지하고 있는데, 잠재력 있는 통신 기술로서 전력선 통신 (PLC, Power Line Communication)이 거론되고 있다. PLC는 말 그대로 기존의 전력선으로 데이터를 전송 하는 기술이다. 기존의 인프라를 그대로 사용하기 때문에 설치비용이 타 기술에 비해 상당히 저렴하고, 전기를 이용할 수 있는 모든 지점에서 플러그를 꽂기만 하면 손쉽게 인터넷 및 홈 네트워크, 멀티미디어 서비스를 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있다<sup>2,3)</sup>. 또한, 전기를 이용하는 모든 곳을 네트워크화시킬 수 있어 전국적인 네트워크 형성이 용이하며 전력망의 견고한 특성이 그대로 적용된다. 현재 세계 각국 및 기업들이 연합된 HomePlug, G.h/n, OPERA, 등과 같은 표준화 단체에서 PLC에 대한 많은 연구와 표준화 작업을 수행하고 있다.

하지만 전력선은 본래 통신을 위해 설계된 것이 아니기 때문에 데이터 전송에 매우 열악한 환경을 갖고 있다. 네트워크상에서 무작위로 on/off 되는 장치들에 의해 발생하는 비동기 (asynchronous) 임펄스 노이즈로 인하여 일정 구간의 데이터가 모두 날아가 버리는 burst 오류가 발생할 수 있고, 네트워크에 연결된 장치들과 전력선 간의 서로 다른 임피던스로부터 임피던스 부정합 (mismatching)에 의해 반사파가 발생함으로써 신호의 지연이 일어나게 되는 다중 경로 페이딩 채널 특성을 띠게 된다. 이는 심벌 내 간섭 (ISI, Inter Symbol Interference)을 야기하여 시스템 성능을 저하시킨다. 따라서 전력선 상에서의 신호 전송에 많은 어려움을 겪고 있다<sup>4)</sup>.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해서 직교 주파수 분할 다중 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기법을 도입하였는데, 이 기법은 서로 서로 직교하는 부반송파마다 데이터를 실어서 병렬로

동시에 전송하는 기술이다. 따라서 OFDM을 사용하면 높은 전송률 및 주파수 선택적 페이딩 환경(또는 다중 경로 환경)에 강한 특성, ISI 억제 효과를 얻을 수 있다. 그러나 실제로는 부반송파간의 직교성을 정확하게 유지할 수 없기 때문에 부반송파간의 간섭 (ICI, Inter Carrier Interference) 발생은 불가피하다. OFDM에서는 ICI를 방지하기 위해 CP (Cyclic Prefix)를 OFDM 심벌 앞부분에 삽입한다. CP는 OFDM 심벌의 끝부분으로 구성되어 있기 때문에, CP 구간 내에 OFDM 심벌끼리 겹치게 되더라도 직교성은 유지된다<sup>7,9)</sup>.

기존의 OFDM 기법들은 채널 상태에 상관없이 주로 고정된 CP 길이를 사용하는데, 채널이 좋을 경우에도 항상 일정한 길이의 CP를 사용하기 때문에 송신 전력과 주파수 대역을 낭비하게 되고 데이터 전송 속도를 높일 수 있는 기회 또한 놓치게 된다<sup>10,11)</sup>. 따라서 본 논문에서는 이 부분에 초점을 맞춰 채널 상태에 따라 CP 길이를 조절함으로써 데이터 전송률을 향상시키는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 수신단의 CP controller에서 제일 처음 수신된 신호와 그 보다 지연된 동일 신호를 상관 처리(Correlation)를 취한 후, 그 과정을 통해 얻게 되는 채널 정보를 송신단에 피드백하여, 그 정보를 토대로 전송될 다음 신호의 CP 길이를 조절하게 된다. 이 기법은 어떠한 파일럿 심벌도 필요하지 않으며 매우 빠르게 변화하는 채널 환경에도 적용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 가정한 채널 모델 및 다중 경로 시나리오, 노이즈 모델을 설명한다. III장에서 제안한 적응형 OFDM CP 길이 기법을 설명하고 모의실험 결과를 IV장에서 보여준다. 마지막으로, V장에서 본 논문의 결론을 도출하고자 한다.

## II. 시스템 모델

### 2.1 채널 모델

그림 1은 본 논문에서 가정한 PLC 시스템 모델을 나타낸다. 이진 데이터 스트림은 변조기에서 변조된 후, IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 통해 각 부반송파에 실어진 뒤 모두 더해진다. CP insertion에서 수신단의 CP controller로부터 피드백된 정보에 의하여 적응적인 길이의 CP가 OFDM 변조 신호에 삽입된 후, DAC (Digital-to-Analog Converter)를 통해 전력선으로 전송된다.

수신된 신호는 ADC (Analog-to-Digital Converter)

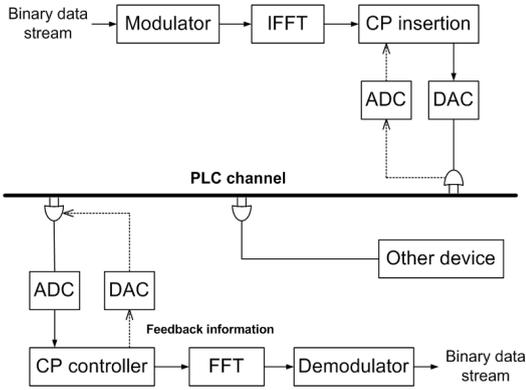


그림 1. PLC 시스템 모델  
Fig. 1. PLC system model

에서 디지털 신호로 변환된 뒤, CP controller에서 CP를 제거하게 된다. 동시에, 수신된 신호들로부터(도착 시간이 다른 동일한 신호들) 채널 지연 정보를 계산하여 송신단으로 피드백 한다. CP가 제거된 수신 신호는 FFT와 복호기를 통하여 원 신호로 복원된다.

### 2.2 PLC 채널 시나리오

전력선은 콘센트에 연결될 수 있는 가전기기들의 다양한 임피던스 때문에 불안정한 전송 채널이다. 임피던스는 주로 케이블의 특성 임피던스와 네트워크 토폴로지, 연결된 전기 부하의 특성에 영향을 받는다<sup>[12]</sup>. 이로 인하여 임피던스 부정합이 발생하기 때문에, 신호가 송신단과 수신단 사이에 직선 경로에서 뿐만 아니라, 추가적인 경로(반사파)에서도 전송된다는 것을 주의해야 한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 다중 경로 시나리오를 모델링하기 위해 M. Zimmerman과 K. Dostert가 제안한 다중 경로 모델을 사용하였으며, 그림 2에 나타내었다<sup>[13]</sup>.

도입한 PLC 채널은 주 전력선에 하나의 branch가 연결되어 있는 형태로써, 송신단 A와 수신단 C, branch가 연결된 지점 B, branch에 연결된 장치 D로

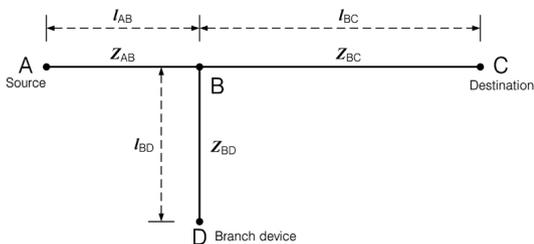


그림 2. 다중 경로 시나리오  
Fig. 2. Multipath scenario

이루어진다. 구간 AB, BC, BD의 길이와 특성 임피던스는 각각  $l_{AB}$ ,  $l_{BC}$ ,  $l_{BD}$ 와  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$ ,  $Z_{BD}$ 로 표시한다. 위 시나리오를 단순화하기 위해서 각 케이블과 직접적으로 연결되어 있는 장치간의 임피던스는 정합되었다고 가정한다 (A 임피던스= $Z_{AB}$ , C 임피던스= $Z_{BC}$ ).

대체로 다중 반사로 인하여 수많은 전파 경로가 생성되는데, 각 경로  $i$ 는 각 경로에 따른 반사계수와 투과계수의 곱인 weighting factor  $g_i$ 를 갖는다. 전력선 상에서의 모든 반사계수와 투과계수는 1보다 작거나 같다. 그 이유는 두 개 또는 그 이상의 케이블이 병렬 연결되어 그 부하가 급전 케이블의 특성 임피던스보다 낮은 임피던스는 야기하는 연결 지점에서만 투과가 발생하기 때문이다. 따라서  $g_i$  역시 1보다 작거나 같다. 경로를 따라 과도전류와 반사가 많이 발생할수록,  $g_i$ 는 더욱 작아질 것이다. 게다가, 경로가 길수록 감쇄도 심해진다. 따라서 이러한 경로를 경유하여 도달한 신호들은 수신지점에서의 전체 신호에 큰 영향을 주지 못한다. 따라서 수많은 경로를  $N$ 개의 주요 경로로 근사화 하고 가능한 적은  $N$ 개의 경로로 만드는 것이 합리적이다.

$i$ 번째 경로에서 지연  $\tau_i$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_i = \frac{d_i \sqrt{\epsilon_r}}{c_0} = \frac{d_i}{v_P} \quad (1)$$

수식 (1)에서  $\epsilon_r$ 은 케이블 절연체의 유전상수,  $c_0$ 는 빛의 속도,  $d_i$ 는 케이블 길이를 의미한다. 케이블 손실은 케이블의 길이와 주파수에 따라 증가하는 감쇄를 야기한다.

주파수 의존적인 감쇄는 파라미터  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $k$ 에 의해서 모델링되며, 결과적으로 다음과 같이 채널 모델을 표현할 수 있다.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i} \cdot e^{-j2\pi f (d_i/v_P)} \quad (2)$$

여기서,  $g_i$ 는 weighting factor이고  $e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i}$ 는 감쇄 부분,  $e^{-j2\pi f (d_i/v_P)}$ 는 지연 부분을 나타낸다.

### 2.3 노이즈 모델

전력선 통신 시스템에서 발생하는 노이즈는 colored 노이즈, narrow-band 노이즈, periodic 임펄스

노이즈, aperiodic asynchronous 임펄스 노이즈 이렇게 4가지로 나눌 수 있다.

Colored 노이즈는 수 분 또는 수 시간에 걸쳐 변하는 낮은 PSD (Power Spectral Density)를 갖으며, 주파수가 증가할수록 감소한다. narrow-band 노이즈는 주로 1~22MHz 대역에서 방송국으로부터 전송되는 AM 변조된 신호에 의해서 발생된다. periodic 임펄스 노이즈는 전력 주파수 (50~60Hz)에 synchronous한 경우와 asynchronous한 경우로 나눌 수 있는데, periodic synchronous 임펄스 노이즈는 짧은 지속시간과 주파수 증가에 따라 감소하는 PSD를 갖으며, 주로 DC 전력원에 의하여 발생한다. 이 노이즈의 반복률 (repetition rate)은 50Hz 또는 100Hz이다. 반면에, periodic asynchronous 임펄스 노이즈는 periodic synchronous 임펄스 노이즈보다 훨씬 높은 반복률을 보이며(50~200kHz), 전력공급원의 스위치 개폐에 의하여 야기된다. 마지막으로, aperiodic asynchronous 임펄스 노이즈는 전력선 통신 시스템에서 데이터 전송에 가장 악영향을 미치는 노이즈이다. 이 노이즈는 background 노이즈 보다 50dB 이상의 에너지를 가지며, 특히 노이즈 지속시간(duration)이 통신 심벌 길이를 종종 넘을 수 있기 때문에, 고속 통신에 심각한 영향을 끼친다. 또한, 가끔 환순간에 폭발적으로 발생하여 데이터의 상당 부분을 손상시킬 수 있다. 이런 종류의 노이즈는 시스템 네트워크에서 on/off에 의한 과도 전류(Switching Transients) 때문에 발생하게 된다. Colored 노이즈, narrow-band 노이즈, periodic synchronous 임펄스 노이즈는 수초에서 수 분, 심지어 여러 시간 동안 변화 없는 특성 (stationary)을 가지기 때문에 background 노이즈로 고려할 수 있다. 하지만, periodic asynchronous 임펄스 노이즈와 aperiodic asynchronous 임펄스 노이즈는 micro-second에서 milli-second 동안 급속도로 변하기 때문에, 임펄스 노이즈 모델 확립은 반드시 필요하다<sup>[14]</sup>.

임펄스 노이즈 모델을 수립하기 위해 Middleton Class A 노이즈 모델을 고려하였다<sup>[15,16]</sup>. 이 모델에 대하여, 전체 노이즈는 두 가지 독립 요소로 이루어진다고 가정한다.

$$z(t) = z_G(t) + z_P(t), \quad (3)$$

여기서, 첫 번째 항  $z_G(t)$ 는 stationary background Gaussian 노이즈 요소이고, 두 번째 항  $z_P(t)$ 는 임펄스 노이즈 요소이다. 임펄스 노이즈의 도착 시간이

Poisson process를 따른다는 가정 하에 Class A 노이즈 모델의 확률 밀도 함수 (PDF, Probability Density Function)는 다음과 같이 주어진다.

$$f_z(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{a_m}{2\pi\sigma_m^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_m^2}\right), \quad (4)$$

여기서,

$$a_m = e^{-A} \frac{A^m}{m!}. \quad (5)$$

수식 (5)에서  $m$ 는 임펄스 노이즈의 발생 횟수를 나타내며,  $A$ 는 임펄스 노이즈의 평균 발생율과 일반적인 임펄스의 평균 지속시간의 곱으로써, 임펄스 인덱스 (index)라 부른다.

식 (4)에서,  $\sigma_m^2$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_m^2 = (\sigma_g^2 + \sigma_i^2) \frac{m/A + \Gamma}{\Gamma}. \quad (6)$$

파라미터  $\sigma_g^2$ 과  $\sigma_i^2$ 는 각각 background 노이즈와 임펄스 노이즈의 파워를 표시한다.  $\Gamma$ 는 background 노이즈 대 임펄스 노이즈 비 (background-to-impulsive ratio,  $\Gamma = \sigma_g^2/\sigma_i^2$ )로써, 식 (6)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_m^2 = \sigma_g^2 \frac{m/A + \Gamma}{\Gamma + 1}. \quad (7)$$

### III. 제안하는 데이터 전송 기법

기존의 OFDM 기술에서 CP 길이는 보통 채널 상태에 상관없이 고정되었다. 이것은 채널 상태가 좋을 경우 CP 길이에 할당되는 프레임 비트 낭비의 원인이 되며, 시스템 관점에서 성능 저하를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 프레임 자원의 낭비를 줄이고 시스템 성능을 향상시키기 위해 적응형 OFDM CP 길이 기법을 제안한다.

제안된 기법의 주된 목적은 채널 상태가 좋을 때 CP 길이를 줄이는 것이다. CP를 포함하는 전송할 심벌 길이가 줄어들기 때문에, 데이터 처리량이 증가할 수 있다. 전송되는 심벌이 많을수록, 더 높은 데이터 처리량을 얻을 수 있다.

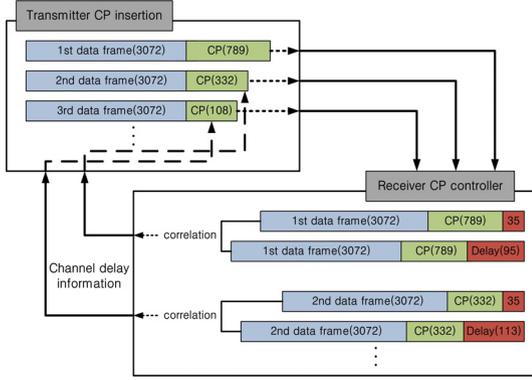


그림 3. 적응형 OFDM CP 길이 기법  
Fig. 3. Adaptive OFDM CP length scheme

제안된 기법의 처리과정은 그림 3에 나타내었다. 먼저 수신단의 CP controller에서 첫 번째로 도착한 신호와 마지막으로 도착한 신호(다시 말해서, 노이즈 레벨을 넘는 신호 중 가장 많이 지연된 신호)를 상관 처리를 취한다. 그 과정에서 FFT 시간과 최대 상관 값을 가질 때의 시간을 비교함으로써 채널 지연 정도를 계산한다. 그 다음 CP controller는 계산된 채널 지연 정보를 송신단으로 피드백 한다. 본 논문에서는 피드백 정보가 전송과정에서 손실되지 않으며, 모든 피드백 정보는 다음 심벌 전송 전에 도착하는 것으로 가정하였다. 따라서 송신단은 채널 지연 정보에 의해서 다음 심벌의 CP 길이를 적절하게 조절한 뒤 전송한다. 이러한 과정을 심벌마다 반복함으로써 CP에 할당되는 비트를 절약하게 된다.

제안된 적응형 OFDM CP 길이 기법의 수학적인

표현은 다음과 같다. IFFT와 CP삽입 후  $l$ 번째 OFDM 심벌의  $k$ 번째 부반송파로 전송된 신호  $s(n)$ 은 수식 (8)처럼 나타 낼 수 있다.i) 여기서,  $d_{l,cp}$ 와  $d_{l,data}$ 는 OFDM 변조된 CP와 데이터 심벌이며,  $N, N_{CP}, n, k$ 는 각각 FFT point, 초기 CP 길이, 이산 시간 인덱스 (discrete time index), 부반송파 주파수 인덱스를 나타낸다. 따라서 수신된 심벌  $r(n)$ 은 수식 (9)와 같이 표현할 수 있다.ii) 수식 (9)을 수식 (10)으로 다시 정리할 수 있다.iii) 여기서,  $h(k)$ 는 PLC 채널 함수로써 아래와 같다.

$$h(k) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \alpha_i \delta(k - k_0 - i), \quad (11)$$

수식 (11)에서  $\alpha_i, k_0, i$ 는 각각 채널 감쇠 계수, 첫 번째 도착 심벌의 초기 지연값, 다중 경로 심벌의 지연 인덱스를 표시한다.  $z(n)$ 는 노이즈이다.

수식 (10)에서 수식 (11)를 대입하면, 수식 (12)로 표현되며iv), Dirac 델타 함수의 특성에 의해서, 수식 (13)처럼 간소화할 수 있다.v) 따라서 PLC 채널을 통과한 수신된 신호는 다음과 같다.

$$r(n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \alpha_i d_l(n - m_0 - i) + z(n) \quad (14)$$

여기서,  $d_l$ 은 CP와 데이터를 모두 포함한 OFDM 심벌이다.

첫 번째 지연된 심벌의 경우 (즉,  $i = 0$ ),

$$i) \quad s(n) = \left\{ \sum_{k=0}^{N_{CP}-1} d_{l,cp}(k) + \sum_{k=N_{CP}}^{N+N_{CP}-1} d_{l,data}(k) \right\} \exp(j2\pi k \frac{n}{N}) \quad (8)$$

$$ii) \quad r(n) = s(n) * h(n) + z(n) \\ = \left\{ \sum_{k=0}^{N_{CP}-1} (d_{l,cp}(k) * h(k)) + \sum_{k=N_{CP}}^{N+N_{CP}-1} (d_{l,data}(k) * h(k)) \right\} e^{j2\pi k \frac{n}{N}} + z(n) \quad (9)$$

$$iii) \quad r(n) = \left[ \sum_{k=0}^{N_{CP}-1} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} (h(m) d_{l,cp}(k-m)) \right\} + \sum_{k=N_{CP}}^{N+N_{CP}-1} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} (h(m) d_{l,data}(k-m)) \right\} \right] e^{j2\pi k \frac{n}{N}} + z(n) \quad (10)$$

$$iv) \quad r(n) = \left[ \sum_{k=0}^{N_{CP}-1} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left( \sum_{i=-\infty}^{\infty} \alpha_i \delta(m - m_0 - i) d_{l,cp}(k-m) \right) \right\} + \sum_{k=N_{CP}}^{N+N_{CP}-1} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left( \sum_{i=-\infty}^{\infty} \alpha_i \delta(m - m_0 - i) d_{l,data}(k-m) \right) \right\} \right] e^{j2\pi k \frac{n}{N}} + z(n) \quad (12)$$

$$v) \quad r(n) = \left\{ \sum_{k=0}^{N_{CP}-1} \left( \sum_{i=-\infty}^{\infty} \alpha_i d_{l,cp}(k - m_0 - i) \right) + \sum_{k=N_{CP}}^{N+N_{CP}-1} \left( \sum_{i=-\infty}^{\infty} \alpha_i d_{l,data}(k - m_0 - i) \right) \right\} e^{j2\pi k \frac{n}{N}} + z(n) \quad (13)$$

$$r_0(n) = \alpha_0 d_l(n - m_0) + z(n) \quad (15)$$

$\tilde{i}$  번째 지연된 심벌의 경우 (즉,  $i = \tilde{i}$ ),

$$r_{\tilde{i}}(n) = \alpha_{\tilde{i}} d_l(n - m_0 - \tilde{i}) + z(n) \quad (16)$$

채널 지연 값을 계산하기 위해서, 노이즈 레벨을 넘는  $r_0(n)$ 과  $r_{\tilde{i}}(n)$ 을 상관 처리를 취한다.

$$R_{r,r_{\tilde{i}}}(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \alpha_0 \alpha_{\tilde{i}} d_l(m - m_0) d_l(m - m_0 - \tilde{i} + \tau) \quad (17)$$

$R_{r,r_{\tilde{i}}}(n)$ 이 최대값을 갖는 지점이 채널 지연 값으로,  $\tau = \tilde{i}$ 일 경우,  $R_{r,r_{\tilde{i}}}(n)$ 는 최대값을 갖는다. 따라서 채널 지연은  $m_0 + \tilde{i}$ 이고, CP controller는 이 정보를 송신단으로 피드백 한다. CP 길이가 조정된 다음 심벌은 수식 (18)과 같이 표현된다.vi) 따라서 수신 심벌  $\hat{r}(n)$ 는 수식(19)와 같이 나타낼 수 있다.vii)

전송된 총 심벌 개수가  $P$ 일 때, 매 심벌마다 감소된 심벌의 샘플 개수, 즉 CP로 할당된 샘플 중 사용되지 않은 샘플 개수를 데이터 이득  $G_{data}$ 라고 하면,  $G_{data}(n)$ 는  $s(n) - \hat{s}(n)$ 로 나타낼 수 있다. 따라서

$$G_{data}(n) = \sum_{l=1}^P \left\{ \sum_{k=0}^{N_{cp} - m_0 - \tilde{i}} d_{l,cp}(k) \exp(j2\pi k \frac{n}{N}) \right\} \quad (20)$$

#### IV. 모의실험 결과

본 논문에서는 HomePlug AV Specification Version 1.1의 AV payload 데이터 파라미터를 사용하였으며, 표 1에 정리하였다<sup>[7]</sup>. 실험은 전력선 branch의 개수  $N_{br}$ 이 3, 5, 10개인 경우에 대하여 수행되었다.

그림 2에서 주 전력선 구간  $l_{AC} = l_{AB} + l_{BC}$ 를 40m로 고정하고, branch 길이는 각각 2~10m 범위 내에서 패킷마다 무작위로 결정되도록 하였다. 그리고 각 branch 끝단에 연결되어 있는 장치들의 상태 또한 무

표 1. 실험 파라미터  
Table 1. Simulation Parameters

Parameters	Values
Bandwidth	1.80 ~ 30 MHz
Sampling frequency	75 MHz
IFFT interval	3072 samples
Cyclic prefix interval	789 samples
Extended symbol interval	3861 samples
FFT period	40.96 $\mu$ s
Extended symbol length	51.48 $\mu$ s

작위로 on/off 되도록 설정하였다. 따라서 각 branch 개수에 대한 다중 경로 시나리오마다 실질적인 branch 개수가 달라지므로 다양한 지연 값을 갖는 다중 경로 환경이 조성된다. 변조 방식으로는 BPSK (Binary Phase Shift Keying)를 사용하였다. 마지막으로 임펄스 노이즈 모델에서  $m$ 은 3,  $A$ 와  $I$ 는 각각 0.1로 설정하였다.

그림 4~그림 6은 branch 개수에 따른 채널 응답을 보여준다.  $N_{br}$ 가 증가할수록 주파수 선택적 페이딩이 현상이 심해지므로 채널 상태는 점점 나빠진다. 그리고 주파수가 높아질수록 채널의 감쇄 정도도 증가함을 알 수 있다.

그림 7은 고정된 CP 길이 기법과 제안된 적응형 CP 길이 기법간의 CP를 통한 누적 데이터 전송률을 보여준다. 전송된 패킷 수가 증가할수록 적응형 CP 길이 기법의 데이터 전송률은 그 CP를 통하여 전송되는 데이터의 누적되는 정도가 증가하는 반면에, 고정된 CP 길이 기법은 데이터 전송률의 향상이 없으므로 그 누적량은 0으로 일정하다. 그리고 branch 개수( $N_{br}$ )가 많아질수록, 채널의 상태가 나빠지기 때문에 CP를 통한 누적 데이터 전송률은 그 증가폭이 점점 줄어드는 것을 확인하였다.

그림 8에서는 임펄스 노이즈를 고려하지 않은 PLC 채널( $N_{br} = 10$ )에서의 BER 성능과 임펄스 노이즈를 적용한 PLC 채널에서의 적응형 CP 기법과 고정 CP 기법의 BER 성능을 비교하였다. 일반적인 AWGN 채널과 PLC 채널에서의 BER 성능이 상당한 차이가 있음을 알 수 있으며, 임펄스 노이즈를 적용한 두 기법의

$$vi) \quad \hat{s}(n) = \left\{ \sum_{k=0}^{m_0 + \tilde{i} - 1} d_{l,cp}(k) + \sum_{k=m_0 + \tilde{i}}^{N + m_0 + \tilde{i} - 1} d_{l,data}(k) \right\} \exp(j2\pi k \frac{n}{N}) \quad (18)$$

$$vii) \quad \hat{r}(n) = \left\{ \sum_{k=0}^{m_0 + \tilde{i} - 1} (d_{l,cp}(k) * h(k)) + \sum_{k=m_0 + \tilde{i}}^{N + m_0 + \tilde{i} - 1} (d_{l,data}(k) * h(k)) \right\} \exp(j2\pi k \frac{n}{N}) + z(n) \quad (19)$$

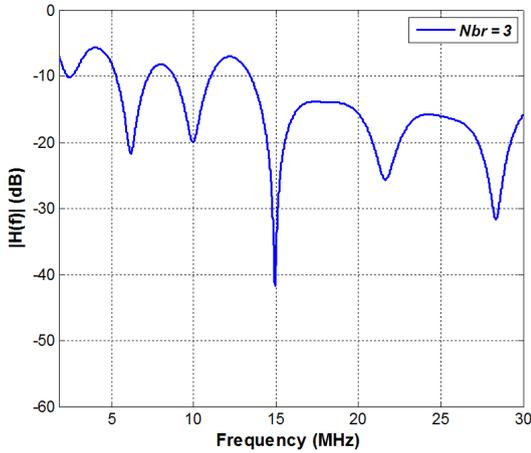


그림 4. 채널 응답 ( $N_{br}=3$ )  
Fig. 4. Channel response ( $N_{br}=3$ )

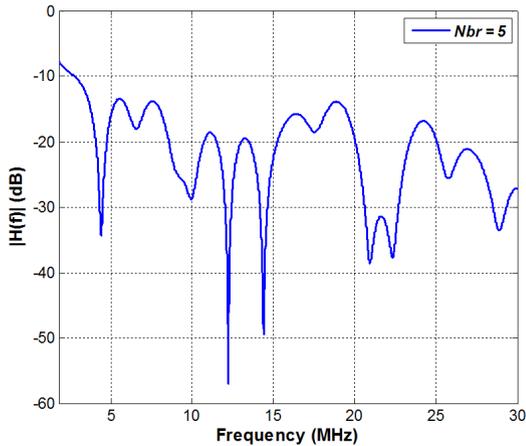


그림 5. 채널 응답 ( $N_{br}=5$ )  
Fig. 5. Channel response ( $N_{br}=5$ )

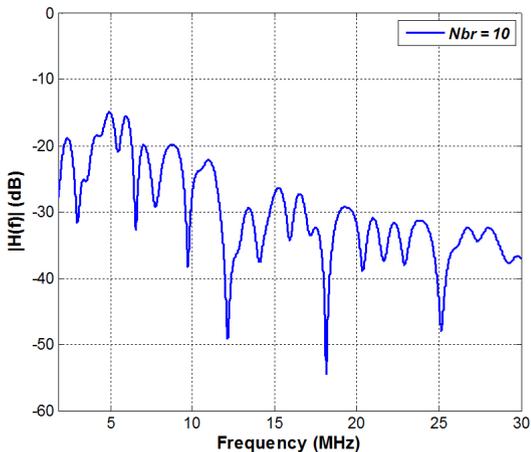


그림 6. 채널 응답 ( $N_{br}=10$ )  
Fig. 6. Channel response ( $N_{br}=10$ )

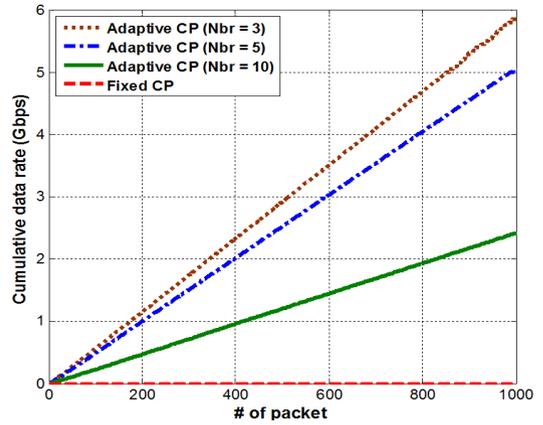


그림 7. CP를 통한 누적 패킷 데이터 전송률 비교 ( $N_{br}=3, 5, 10$ )  
Fig. 7. Comparison of cumulative packet data rate with CP ( $N_{br}=3, 5, 10$ )

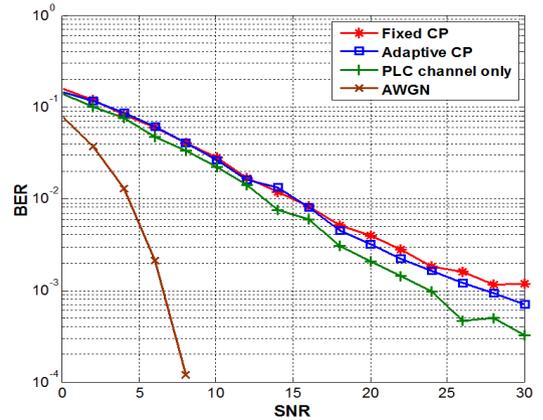


그림 8. 제안된 기법과 고정 CP 기법의 BER 성능 비교 ( $N_{br}=10$ )  
Fig. 8. Comparison of BER performance between the proposed scheme and the fixed CP scheme ( $N_{br}=10$ )

BER은 PLC 채널만 적용한 BER에 비해 약 3dB 정도 낮은 성능을 보임을 확인하였다.

제안된 기법과 고정 CP 기법 모두 비슷한 성능을 보이고 있으며,  $N_{br}$ 이 3, 5 인 경우에도 그림 8과 비슷한 성능을 나타내었다. 따라서 제안된 알고리즘은 BER 성능 저하 없이 데이터 전송률을 향상시킴을 확인하였다.

## V. 결론

본 논문에서는 스마트 그리드를 위한 전력선 통신 시스템에서 데이터 전송률 향상시킬 수 있는 적응형

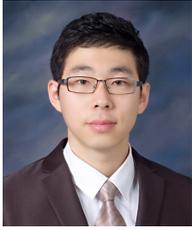
OFDM CP 길이 기법을 제안하였다. 가장한 전력선 구조는 하나의 주 전력선과 임의의 길이와 무작위로 on/off 되는 장치를 갖는 3, 5, 10개의 branch들로 구성되었다. 임펄스 노이즈 모델로 Middleton Class A 간섭 모델을 사용하였다. 실험결과로부터 기존의 고정된 CP 길이 알고리즘에 비해 제안된 적응형 CP 길이 기법을 사용하였을 경우, 데이터 전송률이 현저하게 향상됨을 알 수 있었다. 그리고 전송된 패킷 수가 증가할수록 누적 데이터 전송률이 커짐을 확인하였다. 그러나 각 경우 모두 branch 개수가 많아질수록 향상 정도는 감소하였다. 또한 기존의 기법과 비교하여 BER 성능 저하 없이 데이터 전송률을 향상시켰음을 확인하였다. 따라서 제안된 기법은 스마트 그리드 통신 기술의 한 부분인 고속 PLC 시스템과 자동검침 및 홈 네트워크 등 다양한 서비스를 실현시키는데 적용될 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] Y. M. Doh et al, "A trend analysis of smart grid technology: the convergence of electric power network and IT technologies," *ET Trends*, Vol.24, No.5, pp.74-86, Oct. 2009.
- [2] J. Y. Kim, *Power Line Communication Systems*, GS Intervision Publisher, Seoul, Korea, 2009.
- [3] M. S. Yousuf and M. El-Shafei, "Power line communications: an overview - part I," in *proc of 4th Conf. Innovations in Inf. Technol. '07*, pp.218-222, Nov. 1996.
- [4] H. Hrasnica, A. Haidine, and R. Lehnert, *Broadband Powerline Communications Networks*, England: Wiley, 2004.
- [5] M. Zimmermann and K. Dostert, "An analysis of the broadband noise scenario in power line networks," in *Proc. of IEEE Int. Symp. on Power Line Commun. and Its Applications (ISPLC '00)*, pp.131-138, Apr. 2000.
- [6] M. Zimmermann and K. Dostert, "Analysis and modeling of impulsive noise in broad band powerline communications," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol.44, No.1, pp.249-258, Feb. 2002.
- [7] L. Hanzo and et al, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting*, Wiley, 2003.
- [8] R. Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House, 2000.
- [9] J. Anatory and et al, "Effects of multipath on OFDM systems for indoor broadband power-line communication networks," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.24, No.3, pp. 1190-1197, July 2009.
- [10] M. Babic, J. Baush, T. Kistner, and K. Dostert, "Performance analysis of coded OFDM systems at statistically representative PLC channels," in *Proc. of IEEE Int. Symposium on Power Line Commun. and Its Applications (ISPLC '06)*, pp.104-109, 2006.
- [11] W. Henkel and et al, "The cyclic prefix of OFDM/DMT - a analysis," in *proc. of Int' Zurich Seminar on Broadband Commun. '02*, pp.22-1-3, Feb. 2002.
- [12] J. Anatory, N. Theethayi, M.M. Kissaka, N.H. Mvungi, and R. Thottappillil, "The effects of load impedance, line length, and branches in the BPLC—transmission-lines analysis for medium- voltage channel," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.22, pp.2156-2162, Oct. 2007.
- [13] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol.50, No.4, pp.553-559, Apr. 2002.
- [14] M. Zimmermann and K. Dostert, "An analysis of the broadband noise scenario in power line networks," in *Proc. of IEEE Int' Symposium on Power Line Commun. and Its Applications (ISPLC '00)*, pp.131-138, Apr. 2000.
- [15] D. Middleton, "Statistical-physical model of electromagnetic interference," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, Vol.EMC-19, No.3, pp.106 - 126, Aug. 1977.
- [16] T. Fukami, D. Umehara, M. Kawai, and Y. Morihiro, "Noncoherent FSK optimum receiver over impulsive noise channels," in *Proc. of IEEE Int. Symposium on Power Line Commun. and Its Applications (ISPLC '03)*, pp.91-96, Mar. 2003.
- [17] *HomePlug AV Specification Version 1.1*, was released in May. 2007

김 요 철 (Yocheol Kim)

준회원



2009년 2월 광운대학교 전파  
공학과  
2009년 3월~현재 광운대학교  
전파공학과 석사과정  
<관심분야> 전력선 통신, 이동  
통신, MIMO-OFDM

김 윤 현 (Yoon Hyun Kim)

정회원



2006년 2월 광운대학교 전파  
공학과  
2008년 2월 광운대학교 전파  
공학과 석사  
2008년 3월~현재 광운대학교  
전파공학과 박사과정  
<관심분야> 전력선통신, 가시  
광 통신, 이동통신, multi-user MIMO, 협력통신

배 정 남 (Jung Nam Bae)

준회원



2009년 2월 광운대학교 전파  
공학과 학사  
2009년 3월~현재 광운대학교  
전파공학과 석사과정  
<관심분야> 디지털 방송/통신,  
4G이동통신, 전력선통신,  
MIMO/OFDM

김 진 영 (Jin Young Kim)

종신회원



1998년 2월 서울대학교 전자  
공학과 공학박사  
1998년 2월~1999년 2월 미국  
Princeton University, Research  
Associate  
2000년 3월~2001년 2월 SK  
텔레콤 중앙연구원 책임연구원  
2009년 3월~2010년 2월 미국 M.I.T 공대 Visiting  
Scientist  
2001년 3월~현재 광운대학교 전파공학과 교수  
<관심분야> 전력선 통신, 스마트 그리드, 가시광 통  
신, UWB, LED-ID, DMB, RFID/USN 기술, 이  
동무선통신, 통방융합기술, 인지 무선 통신