

# 500Kbps급 디지털 전력선 통신 시스템의 모델링과 성능분석

## Performance evaluation and Modeling for 500Kbps Digital Power Line Communication system

김 범 규\*  
Kim, Bum Gyu

최 성 환\*\*  
Choi, Sung Hwan

권 호 열\*\*\*  
Kwon, Ho Yeol

### ABSTRACT

In this paper, we presented a modeling of the power line channel and a new digital communication system over the channel. Firstly, we proposed a new tranceiver structure with DS-CDMA spread spectrum technique and convolutional coder and block interleaver against severe noisy power line environment. Also, QPSK modulation technique was used to get bandwidth efficiency. And then we performed a simulative evaluation of the system using MATLAB communication/simulink toolbox. According to the simulation results, the proposed system gives  $10^{-6}$  BER at 20dB SNR.

키워드 : 디지털 전력선 통신, 채널 손상요인, DS-CDMA

Keywords : digital power line communication system, channel distortion factor, DS-CDMA

### 1. 서 론

HA(Home Automation), OA(Office Automation)등을 목적으로 개발된 디지털 전력선 통신시스템은 X-10, CEBus, LonWorks등이 있으며, 이러한 시스템은 약 60Kbps~10Kbps급의 저속 전송속도를 제공할 수 있다. 또한, 최근에 영국의 Norweb사에 의해 개발된 전력선 통신 시스템은 500Kbps~1Mbps급의 고속 전송속도를 제공할 수 있다.[1,7,8]

전력선을 데이터통신망의 채널로 사용하면, 통신선로확보에 대한 부가설치비용절감, 네트워크 드라이버를 위한 파워공급 절감, 유동적인 네트워크 노드활용 등의 이점을 갖는다. 그러나, 인터넷 등의 고급 데이터 정보 제공망은 수 100Kbps~수Mbps급의 고속 전송을 요구하는 반면, 전력선은 채널 고유의 선로손상요인이 크다는 제한성을 갖는다. 그러므로, 전력선을 고속의 디지털 데이터 통신망에 사용하

려면 잡음특성을 극복할 수 있는 대역확산기법과 제한된 대역폭을 최대한 활용하여 고속의 전송속도를 가질 수 있도록 설계해야 한다. 그림 1은 전력선망을 이용한 데이터 통신 시스템으로 전력선공급업체를 통해 통시서비스를 제공할 수 있는 통신 시스템 모델이다.[1,6,7]

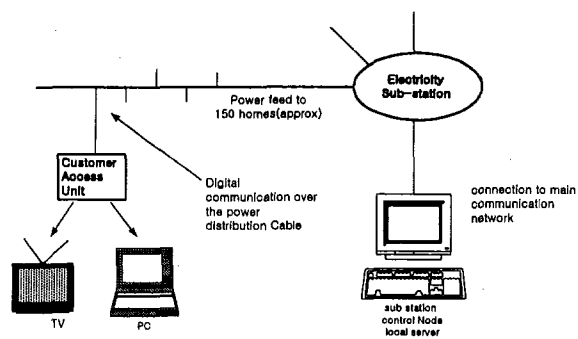


그림 1. 전력선망을 이용한 데이터 통신시스템[6,7]

본 논문에서는 CDMA 대역확산 기술과 QPSK 변복조 방식을 적용하여 디지털 전력선 통신 시스템 제안한다. 이를 위해 2장에서 전력선의 선로특성을 분석하고 채널을 모

\* 강원대학교 전자공학과 석사

\*\* 강원대학교 컴퓨터공학과 석사과정

\*\*\* 강원대학교 컴퓨터공학과 부교수, 공학박사

필링한다. 3장에서는 디지털 전력선 통신망의 특성에 대해 기술하고, 제안한 전력선 통신 시스템을 설명한다. 그리고 4장에서는 제안한 전력선 통신시스템을 시뮬레이션하고, 시스템의 성능을 SNR /BER 특성을 이용하여 분석한다.

## 2. 전력선 통신 시스템

### 2.1 전력선의 선로특성

전력선망의 등가회로는 사용주파수대역이 DC~15MHz이므로, 이에 따른 전력선의 등가회로는 주파수에 의존하는 함수로 표현된다. 그림 2는 전력선로의 등가회로이다.

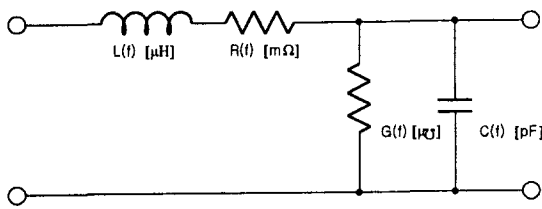


그림 4. 주파수에 따른 전력선의 등가회로

$$Z_{oc}(f) = Z_R(f) \frac{V_L(f)}{V_R(f)} \Big|_{\text{open circuit}} \quad (1)$$

$$Z_{sc}(f) = Z_R(f) \frac{V_L(f)}{V_R(f)} \Big|_{\text{short circuit}} \quad (2)$$

그림 4는 전력선로의  $Z_{oc}$ ,  $Z_{sc}$ 의 크기를 구하기 위해  $Z_R$ 과  $Z_L$ 의 전압을 측정하고, 또한 공통접지에 따라 전압위상이 반전된 기준저항의 특성임피던스 위상값을 FFT를 통해  $\pi$ 만큼 보상하여  $Z_L$ 의 위상각을 구하는 것을 나타낸 것이다.

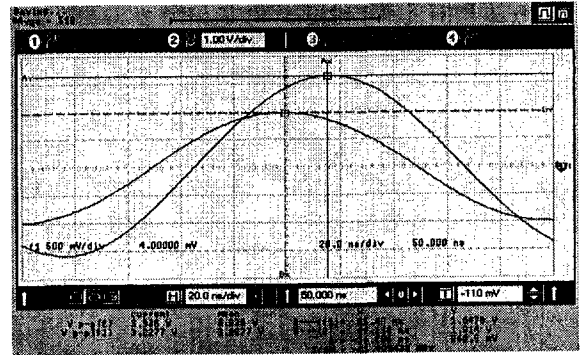


그림 4.  $Z_R$ ,  $Z_L$ 을 이용한 측정  $Z_{oc}$ ,  $Z_{sc}$

본 논문에서 전력선의 등가회로에 대한 RLCG값은 전력선로의 개방회로 임피던스  $Z_{oc}$ 와 단락회로 임피던스  $Z_{sc}$  측정방법을 이용하였다. 먼저, 선로 임피던스  $Z_L$ 을 디지털 오실로스코프와 함수발생기를 이용한 그림 3과 같은 측정회로를 통해 구하였다.

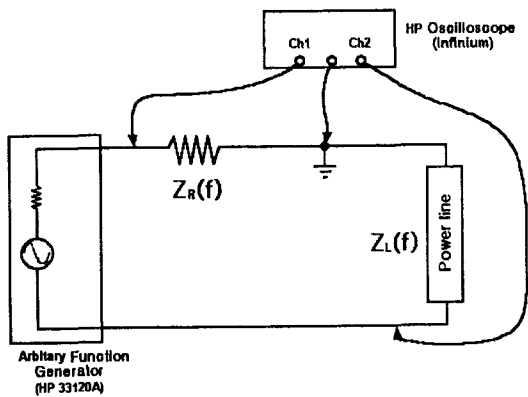


그림 3.  $Z_{oc}$ ,  $Z_{sc}$  측정회로

이때, 측정장비와 연결되지 않은 전력선 끝 부분의 연결 유무로써 개방 및 단락상태가 구성된다. 즉, 전력선의 양끝을 연결하면 단락상태가 되고, 연결하지 않으면 개방상태가 되는 것이다. 그리고, 직렬 회로 상에서는 공통된 전류 관계가 유지됨으로 식 (1)과 (2)에서 보는 바와 같은 과정으로 개방 및 단락 상태에서의 선로 임피던스를 얻을 수 있다.

전력선로의 개방회로 임피던스  $Z_{oc}$ 와 단락회로 임피던스  $Z_{sc}$  값이 얻어지면 식(2)를 이용하여 특성임피던스  $Z_0$ 와 전파상수  $\gamma$ 를 구하며, 여기서  $l$ 은 [m]단위로 나타낸 측정선로의 길이이다.

$$Z_0(f) = \sqrt{Z_{oc}(f) Z_{sc}(f)} \quad (3)$$

$$\gamma(f) = \frac{1}{l} \tanh^{-1} \left( \sqrt{\frac{Z_{sc}(f)}{Z_{oc}(f)}} \right) \quad (4)$$

전력선 전송채널의 1차적인 선로 파라미터 RLCG값은 식 (3)는 특성임피던스  $Z_0$ 와 전파상수  $\gamma$ 를 이용하여 다음과 같이 구한다.[12]

$$R(f) = \text{Re} [Z_0(f) \gamma(f)] \quad (5)$$

$$L(f) = \frac{1}{2\pi f} \text{Im} [Z_0(f) \gamma(f)] \quad (6)$$

$$G(f) = \text{Re} \left[ \frac{\gamma(f)}{Z_0(f)} \right] \quad (7)$$

$$C(f) = \frac{1}{2\pi f} \text{Im} \left[ \frac{\gamma(f)}{Z_0(f)} \right] \quad (8)$$

그림 5는 주파수에 따른 전력선의 RLCG값을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 실선과 점선은 전력선의 길이,  $l$ , 각각 2 m인 경우와 10m 일 경우를 나타낸다.

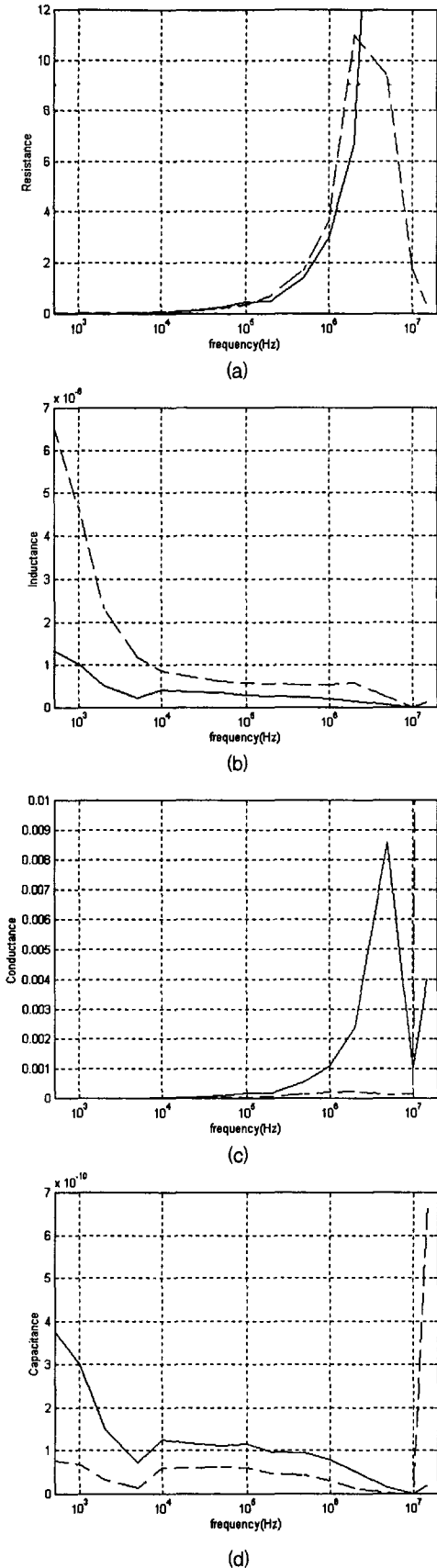


그림 5. 전력선 채널의 1차 선로정수. (a) 저항 R(f), (b) 인덕턴스 L(f), (c) 컨덕턴스 G(f), (d) 커패시턴스 C(f).

식 (3)을 통해 얻은 RLCG값을 이용하여 전력선의 채널 전달함수  $H(d, f)$ 를 구한다.

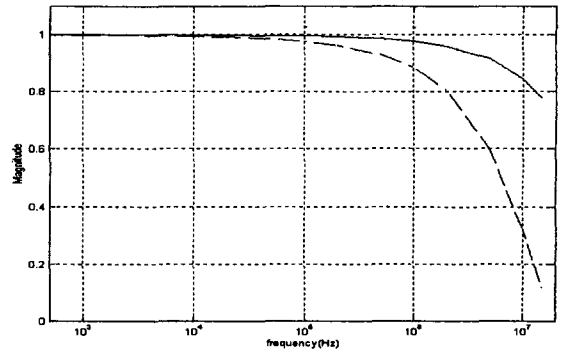


그림 6. 전력선 채널의 전달함수  $H(d, f)$

$$H(d, f) = e^{-d(k_1\sqrt{f} + k_2f)} e^{-jd k_3 f} \quad (9)$$

거리  $d$ 에 따른 전력선의 전달함수  $H(d, f)$ 는 식 (9)와 같다. 전달함수의 최소 평균 오류값을 이용하여 전달함수의 비례상수  $k_1, k_2, k_3$ 에 대한 연립방정식 (10)을 얻을 수 있다.[15]

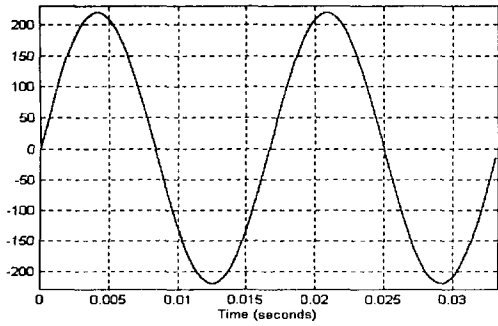
$$\begin{aligned} k_1 \sum_{i=1}^n f_i + k_2 \sum_{i=1}^n f_i^{1.5} &= \sum_{i=1}^n f_i^{0.5} \alpha_i(f_i) \\ k_1 \sum_{i=1}^n f_i^{1.5} + k_2 \sum_{i=1}^n f_i^2 &= \sum_{i=1}^n f_i^{1.5} \\ k_3 &= \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \end{aligned} \quad (10)$$

이때,  $k_1, k_2$ 은 전달함수의 실수값을  $k_3$ 은 허수값을 의미한다. 식 (10)의 연립방정식의 해를 구하여 최종적인 전달함수를 구한다.[15]

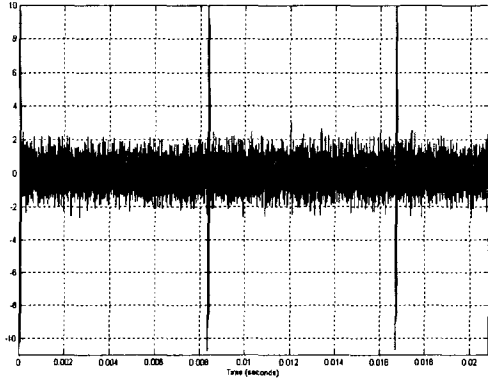
그림 6은 전력선의 전달함수  $H(d, f)$ 를 나타낸 것이며, 식 (4)와 신호감쇠요인이 되는 임피던스의 주파수특성을 나타낸 그래프이다. 특성임피던스는 불안정적이며 주파수에 비례한다.

## 2.2 채널 손상요인

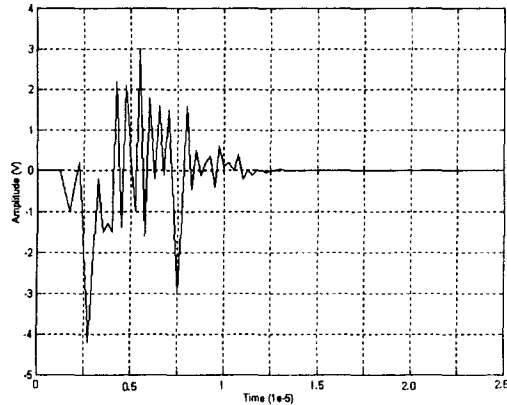
전력선의 통신선로 특성을 결정짓는 것은 선로손상요인으로 작용하는 다양한 잡음요소와 채널의 전달함수이다.[2,5] 본 논문에서는 잡음 요소를 우선적으로 고려하여 채널을 모델링 하였다. 이때 전력선에 유입되는 잡음들은 60Hz 전원 잡음, 주기적인 임펄스성 잡음, 백색부가잡음 등이 있다. 본 논문에서는 임펄스성 잡음중에서 DSL에서 시험용으로 사용되는 2가지의 임펄스잡음을 추가하여 채널을 모델링하였다.



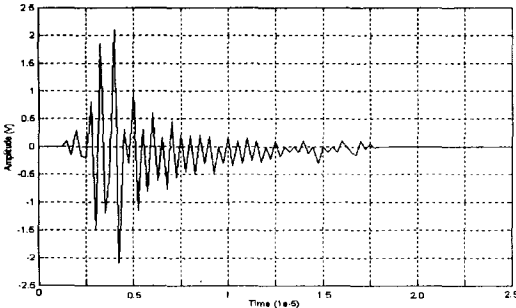
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 전력선 채널의 잡음 (a) 60Hz 전원 잡음, (b) 가전제품의 임펄스 잡음, (c) DSL 시험용 임펄스 잡음1, (d) DSL 시험용 임펄스 잡음2.

그림 7은 각각 본 논문에서 시뮬레이션에 사용한 60Hz 전원잡음과 120Hz 임펄스성 잡음 그리고 시험용 임펄스 잡음이다.

이상과 같이 모델링한 전력선 선로의 잡음특성을 이용하여 채널을 구성하면, 그림 8과 같이 전원잡음에 의해 60Hz의 포락선을 갖고, 3가지 강한 임펄스성 잡음에 의해 왜곡된 신호특성을 얻을 수 있다. 이때, 그림 아래의 1, 0으로 표현된 신호가 정보신호이며 채널에 대한 시뮬레이션은 MATLAB을 이용하였다.

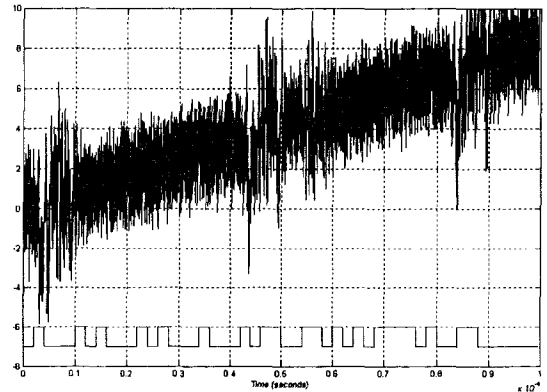


그림 8. 전력선 채널의 잡음에 의한 신호왜곡

### 3. 모델링과 성능분석

#### 3.1 시스템의 모델링

디지털 전력선 통신시스템의 전체적인 구조를 그림 9에 나타내었다.

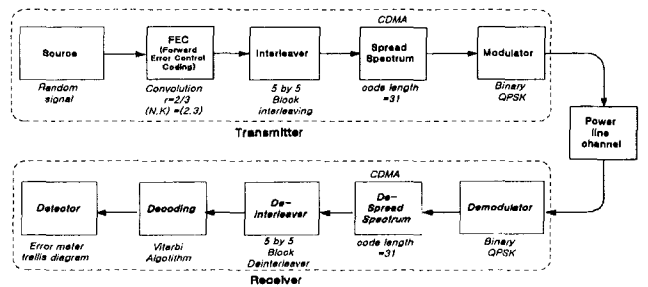


그림 9. 전력선 통신시스템의 전체구조

본 연구에서 사용된 그림 9의 오류정정부호(FEC) 시스템에서 콘볼루션 부호기의 입력신호  $m(D)$  와 부호화된 출력신호  $c(D)$ 의 관계는 (11)식과 같다.

$$c(D) = G(D)m(D) \quad (11)$$

단,

$$G(D) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1+D+D^2 \\ 0 & 1 & 1+D^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

따라서 컨볼루션 부호기의 전체 회로도도 그림 10 과 같이 나타낼 수 있다.

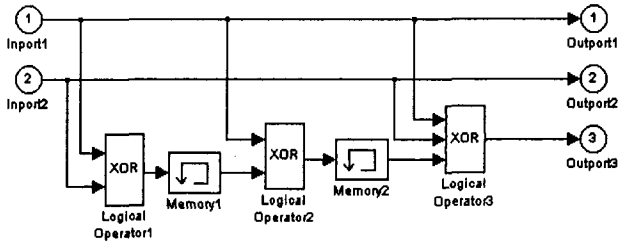


그림 10. 컨볼루션 부호기(2/3)

한편, 그림 10의 (3,2,3) 컨볼루션 부호기에서 얻어지는 부호이득은 부호율, 부호의 최소해밍거리, 비트당 평균 에너지를 각각  $R_{code}$ ,  $d_{min}^h$ ,  $\bar{E}_b$  이라고 할 때 (13)식과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Code Gain} &= R_{code} \times d_{min}^h = R_{code} \times 2\sqrt{\bar{E}_b} \\ &= \frac{2}{3} \times 2 \times \sqrt{2} = 1.886 \text{ dB} \end{aligned} \quad (13)$$

또한, 5비트×5비트 블록간삽기를 이용하여 연립오류 발생을 억제하였다. 그림 24는 5비트×5비트 블록 간삽기의 구조이다.

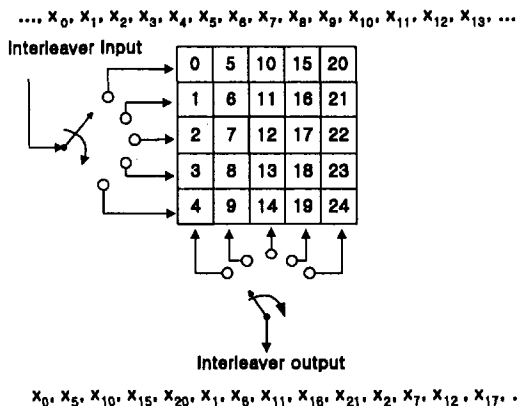


그림 11. 간삽기의 구조

전송신호는 NFR(Near Field Radiation)을 발생하지 않기 위해 송신전력을  $0.5\text{mW}/10\text{KHz} \times 500\text{KHz} = 25 \text{ mW}$  로 낮춰야 한다. 그러므로, 대역확산방식은 고속 전력선 통신 시스템에는 잡음 특성에 강하고 코드 길이에 따른 다중화 특성을 갖는 DS-CDMA 대역확산방식을 사용하였다. 식 (14)은 확산코드길이가 31일 때 얻을 수 있는 처리이득으로 신호에 대한 SNR로 표현된다.

$$G_{proc} = \frac{BW_{code}}{R_{info}} \quad (14)$$

이때,  $G_{proc}$  는 처리이득,  $BW_{code}$  는 스펙트럼 확산신호의 대역폭, 그리고  $R_{info}$  는 대역확산이 일어나기 전의 기저대역 신호가 갖는 정보전송율이다.

변복조 방법은 대역폭의 효율을 높일 수 있는 QPSK방식을 사용하였으며, 송신기의 구조는 그림 12와 같다.

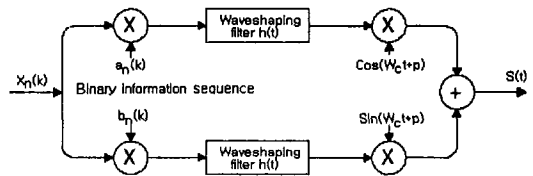


그림 12. QPSK 변조와 대역 확산

변조와 대역확산 과정을 거친 후 얻어지는 Inphase 채널과 Quadrature 채널의 출력신호는 각각 (15)식 및 (16)식과 같다.

$$\sqrt{E_c(k)} \sum_n x_n(k) b_n(k) h(t - nT_c) \cos(2\pi f_0 t + \phi_k) \quad (15)$$

$$\sqrt{E_c(k)} \sum_n x_n(k) a_n(k) h(t - nT_c) \sin(2\pi f_0 t + \phi_k) \quad (16)$$

이때,  $f_0$  는 반송파 주파수,  $h(t)$  는 파형정형필터의 임펄스 응답,  $a_n$ 과  $b_n$ 는 대역확산을 위한 2진 의사잡음 시퀀스, 그리고  $T_c$  는 의사잡음 시퀀스에 대응하는 임펄스열의 칩(chip)주기,  $E_c(k)$  는 칩(chip)당 에너지이다.

그림 13은 수신단에서 QPSK복조와 CDMA대역 역확산하는 과정을 나타내는 시스템 구조이다.

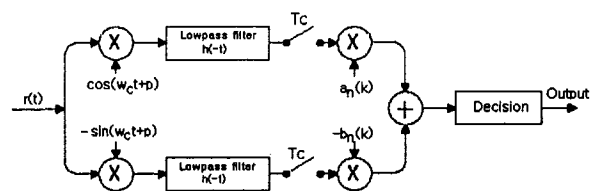


그림 13. QPSK 복조와 대역 역확산

### 3.2 시뮬레이션 및 성능평가

그림 15는 시뮬레이션 도구인 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션한 전력선 통신 시스템의 전체 구조이다.

본 논문에서 제안한 통신 시스템에서 사용하는 주파수 대역폭은 반송파가 6MHz이고 CDMA에 의한 확산대역은 11.23MHz이다. 제안한 전력선 통신 시스템에서 FEC(Forward Error Correction)에 사용된 컨볼루션 부호기를 사용하였다.

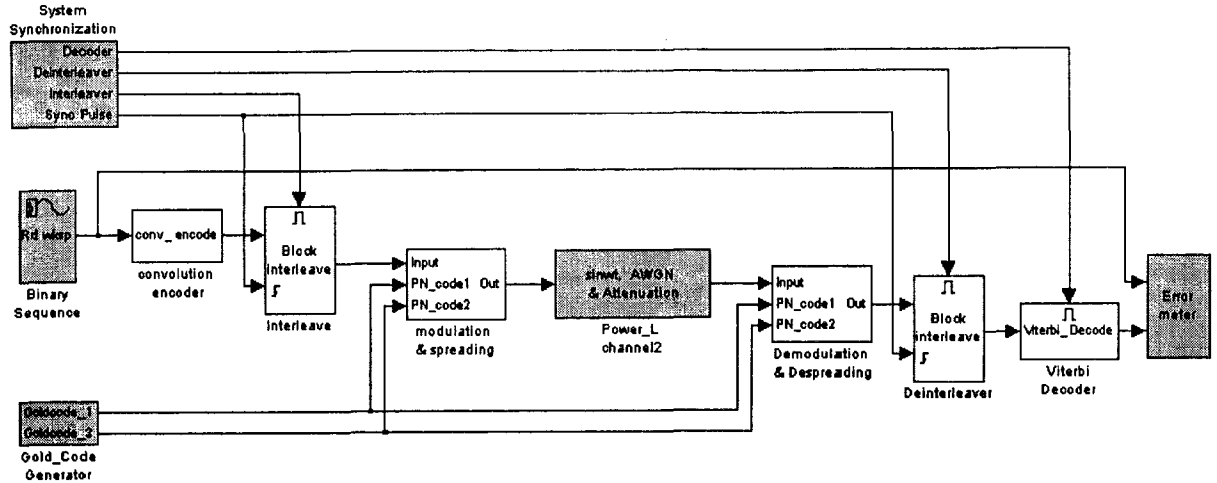


그림 14. 전체 시뮬레이션 환경

이때, 부호기의 부호율은 부호율에 대한 오류정정효율 (Error Correction Efficiency)과, 대역폭사용의 효율성을 동시에 만족할 수 있는 부호율을 선택하였다.

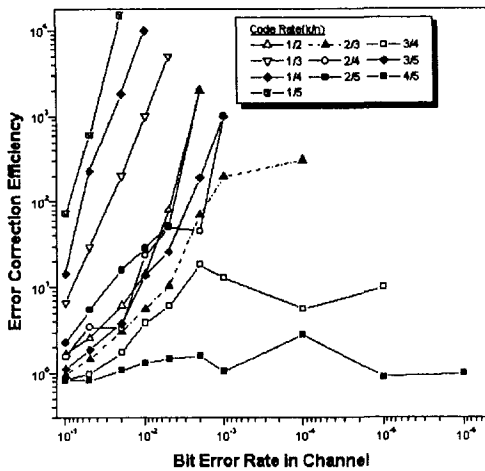


그림 15. 콘볼루션 부호기의 부호율과 오류정정효율

콘볼루션 부호기에 의해 감소한 오류 발생율과 채널의 오류발생율에 대한 비율을 부호효율이라고 할 때 부호율과 부호효율의 관계는 그림 15와 같다. 즉, 부호율이 낮을수록 부호효율이 향상된다. 반면 대역폭 사용은 부호율에 반비례한다. 그러므로, 부호효율이 우수하고, 대역폭 사용율이 낮은  $K/N=2/3$  부호율이 시스템에 적합하다.

본 논문에서 시스템성능을 분석하기 위해 SNR/BER을 구하였다. DS-CDMA 시스템의 SNR은 식(17)를 이용하여 얻을 수 있다.[3]

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_R T_b}{N_0} = \left( \frac{P_R}{W N_0} \right) G_{proc} = \left( \frac{P_R}{P_N} \right) G_{proc} \quad (17)$$

이때,  $E_b = 2$  는 비트당 에너지,  $N_0=2 \sigma^2=1$  은 채널의 분산값,  $P_N$  은 평균 잡음전력,  $PR=2$  는 수신신호의 평균전력,  $T_c = 2\mu\text{sec}$  은 정보심볼의 주기,  $G_{proc}=15\text{dB}$  는 CDMA처리이득으로서 분산값  $\sigma^2$ 은 잡음의 1Hz당의 전력값을 나타내는  $N_0$  값을 결정한다.

제안된 시스템의 성능평가를 위한 오류확률은 MATLAB의 비트오류미터를 이용하여 최저 -10dB에서 30dB구간의 SNR에 대하여 오류확률을 측정하였다.

그림 16은 QPSK변복조만 사용한 시스템, QPSK 변복조와 CDMA를 사용한 시스템, 그리고 QPSK변복조, CDMA, 오류제어시스템을 모두 적용한 시스템의 SNR 대 BER을 각각 시뮬레이션을 통해 얻은 값이다. 그림에서 알 수 있듯이 QPSK변복조만 사용한 시스템 보다 CDMA와 오류제어시스템을 적용하면 약 8dB만큼 이득이 개선된다는 것을 알 수 있다.

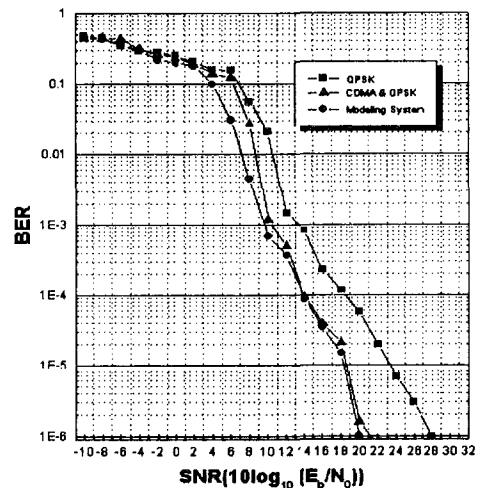


그림 16. SNR/BER 특성

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전력선의 선로손상요인이 되는 임펄스성 잡음과 연속 전원잡음, 그리고 배경잡음을 이용하여 전력선 채널의 통신선로를 모델링하였다. 그리고 500kbps급 디지털 전력선 통신에 적합한 전력선 통신시스템을 모델링하였다. 이때 직접 대역확산방법인 DS-CDMA를 전력선의 잡음 특성을 극복하는데 이용하였다. 그리고 QPSK 변조 방식을 이용하여 대역폭 사용효율을 높였다. 다양한 콘볼루션 부호기의 오류정정효율을 시뮬레이션하여 디지털 전력선 통신망의 대역폭을 고려한 콘볼루션 부호기를 선택하였다. 그리고 이를 블록간잡기와 병행하여 시스템의 오류발생율을 감소시켰다.

이상과 같이 제안한 디지털 전력 통신 시스템을 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션하고, SNR 대 BER 등의 통신시스템 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 본 논문에서 모델링한 전력선 통신 시스템은 SNR이 20dB인 경우  $10^{-6}$ 의 BER 특성을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 또한 DS-CDMA 대역확산과 오류제어시스템에 의해 약 8dB의 SNR이득을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 대역확산기법과 오류제어시스템을 통해 전력선 고유의 선로손상요인을 극복할 수 있고, 500Kbps의 고속전송이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

본 논문에 관련하여 향후 연구되어야 할 과제는 첫째 정확한 선로분석을 위해 통신 채널의 신호감쇠 특성을 측정하고 이를 분석, 둘째 신호감쇠특성을 극복하기 위해 전력선에 적합한 채널 동화기를 설계, 마지막으로 현재 국내에서 사용되는 전력선망을 연구하여 한국형에 맞는 전력선 모델을 개발 등이 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] 김범규(1998). 디지털 전력선 통신 시스템의 모델링과 성능분석에 관한 연구, pp 3-52.  
 [2] 권호열, 김범규, 최성환,(1988). LINEMOD-P : A Power Line Channel Modeling Program for CEBus, ICEE 98'. pp 842-844.  
 [3] 장목순(1997). 직접 스펙트럼 확산 방식을 이용한 전력선모델의 설계와 구현. pp 2-16.  
 [4] 신건일(1998). BPSK/QPSK MC-CDMA 시스템의 전송성능분석. pp 52-63.  
 [5] 한국전기연구소(1992). 전력선 통신을 이용한 집단주택 안전관리 시스템 개발. pp 9-34.  
 [6] Luis F. Montaya,(1997). Power Line Communications Performance Overview of the Physical Layer of Available Protocols. pp 1-15.  
 [7] Nigel Linge & Paul A Brown(1998). Tele

-communication Services and Local Access Provision for Digital Power Line, IEEE. pp 1-7.  
 [8] Paul A Brown(1998). A Multi-Media Architecture Facilitating Advanced Inter-Active Customer Services for Digital Power Line. pp 1-12.  
 [9] Paul A Brown(1996). Multi-Media Communications over the Electricity Network, Nortel com., 1996. pp 1-5.  
 [10] Morgan H. L(1986). Attenuation of Communication Signals on Residential and Commercial Intrabuilding Power Distribution Circuits. pp 220-230.  
 [11] Masaoki Tanaka(1988). High Frequency noise power spectrum, impedance and transmission loss of power line in japan on intrabuilding power line communications. pp 37-42.  
 [12] John Cook(1996). Parametric Modeling of twisted pair cable for VDSL. pp 1-12.  
 [13] EIA-600.31-PL Physical Layer & Medium Specification(1995). pp 6-16.  
 [14] Hisaxhi NIWA & Osamu OONO(1997). A Spread Spectrum System with Dual Processing Gains Designed for Cyclic Noise in Power Line Communication, IEICE. pp 2526-2532.  
 [15] Dr. Walter Y Chen. DSL Simulation Techniques and Standards Development for Digital Subscriber Line System(1998). Macmillan Technology Series.