

구내용 전력케이블기반의 UWB통신용 채널특성분석에 관한 연구

차재상, 정재호, 김대식, 김효진, 문경환, 이종주
 서울산업대학교(SNUT), SNUT, 한국전기공사협회(KECA), KECA, 성균관대학교(SKKU), SKKU

A Channel modeling and analysis of indoor power cable for UWB communication system

Jaesang Cha, Jaeho Jeong, Daesik Kim, Hyojin Kim, Kyunghwan Moon, Jongjoo Lee
 SNUT, SNUT, KECA, KECA, SKKU, SKKU

Abstract - 전력계통망 및 수용가는 다양한 형태의 전력케이블 및 전력선이 연계된 분·배전망을 형성하고 있다. 특히, 이렇게 구성된 분·배전망은 하나의 전력계통으로서 연계된 전력망을 형성하고 있으며, 이를 전력선통신의 인프라로 활용할 수 있다. 최근 들어, 전력선통신 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 계통에 연계된 부하와 분기선로 그리고 매질의 특성에 따라 통신환경이 달라진다. 특히 전송 주파수에 따른 신호의 감쇠, 연계된 부하의 종류와 이들 부하로 인한 잡음원의 유입 및 전송신호의 왜곡 등이 주요한 채널환경 요소이다.

본 논문에서는 상기 나열한 한계점을 극복하기 위한 대안으로 전력선 및 케이블의 매질특성을 평가하고, 이에 따른 전송신호의 영향을 분석, 연계된 다양한 부하들의 변동에 따른 통신환경의 변화·영향 그리고 통신성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 또한 전력 케이블 및 선로의 특성과 부하변동 특성을 반영하여 구내용 전력케이블 기반의 UWB(Ultra Wide Band) 통신용 채널 환경을 모델링하는 방안을 제안하고자 한다.

1. 서 론

전력계통은 효율적인 전력전송을 목적으로 다양한 형태의 전력선과 케이블을 이용하여 선로를 구성하였다. 이러한 전력선 케이블은 이미 전국적인 네트워크 인프라를 형성하고 있으며, 전력네트워크 인프라를 활용하여 전력케이블의 일부 구간을 이용한 전력선통신 적용기술에 대한 연구들이 진행되고 있다[1]. 하지만 구내용 전력선통신설비의 경우에는 주로 협대역(narrow band) 채널 및 전송방식을 이용함으로써 통신의 대용량화와 고속데이터 전송에 있어서 한계점을 갖는다. 특히 구내용 전력선통신설비의 경우에는 분기선로의 구성(topology)과 매질의 특성에 따른 변수가 발생하며, 전력계통에 연계되어 있는 부하변동과 임피던스변화 특성 그리고 임펄스 잡음 발생으로 열악한 통신환경이 나타난다[2]. 따라서 고속데이터 전송을 위하여 구내용 전력선통신시스템이 갖는 통신환경의 특성으로 전력케이블 및 선로의 매질 특성과 선로상의 부하변동 특성이 반영된 임펄스잡음에 관한 연구가 요구된다.

본 논문에서는 구내용 전력케이블 기반의 UWB 통신용 채널환경을 모델링하는 방안으로 전력케이블의 특성들 중 전송신호에 영향을 미치는 요소를 도출하고, 전력케이블에 연계된 주요한 부하의 동작 및 변동에 따른 임펄스잡음 특성을 분석하여 부하의 변동에 따른 전송로의 변화 및 형태를 실측 데이터로 모델링하여 부하변동에 따른 구내용 전력케이블 기반의 UWB 통신용 채널의 영향을 보다 정확하게 제시하고자 한다. 또한 대표적으로 도출한 부하변동에 따른 임펄스 잡음이 통신성능에 미치는 영향을 컴퓨터를 이용한 BER(Bit Error Rate) 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 구내용 전력케이블의 매질특성 분석

구내용 전력선통신의 특성은 전송로(전력선 또는 케이블) 즉, 매질의 특성에 따라 기본적인 통신환경이 결정된다. 전력선통신의 전송신호 주파수 대역과 크기는 전력선통신 선로의 구성에 따라서 많은 영향을 받는다.

이처럼 선로를 구성하는 전력선과 전력케이블의 특성들 중에서 전송신호에 영향을 미치는 요소는 선로를 구성하는 임피던스이며, 선로를 구성하는 임피던스는 등가회로 혹은 등가소자로서 저항성(R), 유도성(L), 용량성(C) 소자로 구성된 복잡한 회로망으로 해석된다. 일반적으로 선로길이에 따라서 이들 성분이 증가한다. 또한, 선로를 구성하는 각각의 임피던스와 어드미턴스 성분들은 선로를 형성하는 도체와 전선 또는 케이블간의 상호관계와 구성에 따른 소자값으로 변환하여 나타낸 것으로 크게 직렬선로를 구성하는 저항성분(R), 유도성분(L; 인덕턴스) 그리고 병렬선로를 구성하는 컨덕턴스(G), 용량성분(C; 커패시턴스)로 나타난다.

전력선로를 구성하는 임피던스와 어드미턴스 성분은 수식 (1)~(2)로 표현할 수 있다.

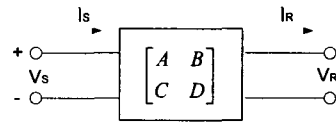
$$z = R + j\omega L = j\omega L \quad [\Omega/m] \quad (1)$$

$$y = G + j\omega C = j\omega C \quad [S/m] \quad (2)$$

수식 (1)~ (2)에서 $\omega = 2\pi f$ 이므로 유도성(L), 용량성(C) 성분에서는 전송

주파수에 따른 선로의 임피던스 및 어드미턴스 특성이 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 저항성 부하성분인 R, G는 고려하지 않는다.

이러한, 전력선로에 구성된 회로상에서 입, 출력 회로 또는 전송(출력)측과 수신(입력)측으로 구성된 시스템의 전송로 특성과 구성된 회로의 임피던스 특성을 해석하는 방법으로 그림 1의 입, 출력 포트에 구성된 2단자 회로로 간략화 하여 임피던스 값을 계산할 수 있다[3].



〈그림 1〉 전력선통신 시스템의 2단자 회로

그림 1은 2단자 회로의 내부 변수들을 나타내는 수식적 표현방법을 A, B, C, D 파라미터로 나타내면 다음 수식 (3)~(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = AV_R + BI_R \quad [V] \quad (3)$$

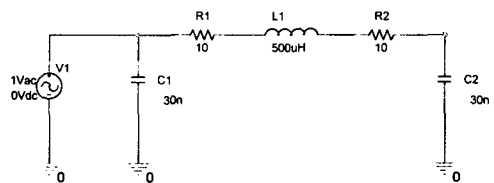
$$I_s = CV_R + DI_R \quad [A] \quad (4)$$

수식 (1)에서 V_s 와 I_s 는 전송(출력)측 전압과 전류이며, V_R 과 I_R 는 각각 수신측 전압 및 수신측 전류를 의미하며, 각각의 파라미터를 구하기 위하여 수식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

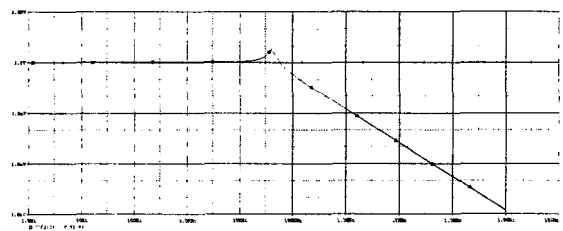
$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{송신측전압} \\ \text{송신측전류} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{전송선로} \\ \text{파라미터} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{수신측전압} \\ \text{수신측전류} \end{bmatrix} \quad (5)$$

수식 (5)에서의 구성변수 A, B, C, D는 복소수 형태이며, 선로상수 R, L, C, G와의 관계로 나타낼 수 있다. 상기 수식과 해석방법을 통하여 선로길이와 구성에 따른 신호의 감쇄(attenuation) 및 전송신호의 주파수에 따른 전송로(전력케이블)의 임피던스 변화 및 주파수 응답을 계산할 수 있으며, 전송신호의 지연(propagation delay) 및 전송에 따른 위상지연(phase lag)과 왜곡(distortion)을 예측할 수 있다.

다음 그림 2는 상기 수식 및 해석방법을 토대로 전력케이블의 제조사의 km당 전기적 특성표를 활용하여 단위길이 1km의 전력선 케이블을 모델링 하였으며, 전송주파수의 선경과 주파수에 따른 전송로의 특성을 분석하기 위하여 모의하였다[4].



〈그림 2〉 단위길이 1km의 전력선 케이블 모델링



〈그림 3〉 전력케이블 주파수 응답특성

그림 3은 상기 모의한 단위 길이 1km당 전력선 임피던스 특성값 즉, 해당 전력케이블의 주파수 응답특성을 모의한 것이다. 그림 3에서 나타난 바와 같이 낮은 주파수 대역인 수십 Hz~10kHz까지는 전송신호가 평탄한 것을 확인할 수 있으며, 50kHz 시점부터 고주파수로 주파수 대역이 증가할수록 거리 또는 임피던스에 따른 전송신호의 감쇠가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 구내용 전력케이블의 전기적 특성을 모델링하고 이들의 주파수 응답 특성을 분석함으로써, 구내용 전력케이블 기반의 UWB통신을 하기 위한 광대역 주파수를 확보하는 방안을 제시할 수 있다.

2.2 구내용 전력케이블을 연계한 부하변동 특성 평가

2.2.1 전력케이블과 연계되는 부하선정

전력케이블과 연계되는 부하의 선정 및 전력선 통신환경을 모의하기 위하여 선정한 부하는 크게 수동소자로 이루어진 부하와 전력변환 장치와 같은 전력전자 소자로 이루어진 능동부하로 나뉠 수 있다.

수동부하는 구성하고 있는 소자특성에 따라서, 일반적으로 저항성(R), 유도성(L), 용량성(C) 부하로 구분할 수 있다. 전동, 전열부하를 포함한 대부분의 부하들은 저항성 부하 특성을 갖는다. 저항성 부하는 전압과 전류신호가 동상(in phase)으로 계속되는 특징, 부하의 기동 혹은 투입과 정지 시 나타나는 과도현상(transient)에서 짧은 시공간 임펄스 잡음이 나타난다. 유도성 부하는 권선 및 코일로 구성된 부하군으로 범용모터(universal motor)를 이용한 전기기기들이 해당된다. 특히, 유도성 부하는 전류신호가 전압신호보다 지연(lag)되는 특징을 나타낸다. 반면, 용량성 부하는 부하내의 특성이 커패시턴스를 갖는 부하로 커패시터로 기동 전동기를 이용한 콤팩트사와 축전장치 등을 들 수 있으며, 유도성 부하와 달리 전압신호가 전류신호보다 지연된다.

능동부하의 경우 전력전자 소자로 구성된 전력변환장치 및 인버터를 사용하는 기기와 조광기 또는 정류기류의 부하들을 예로 들 수 있다. 일반적으로 컴퓨터를 비롯한 대부분의 전자제품의 전원장치로 사용되는 SMPS(Switching Mode Power Supply)의 경우 부하기기의 사용 시 고조파(harmonics)와 고속의 스위칭 잡음이 발생하는 특징이 있다. 특히 SCR(Silicon Control Rectifier) 등과 같은 전력전자 소자로 구성된 부하의 경우 전류의 위상제어에 따른 비교적 큰 고조파와 임펄스 잡음을 발생한다[5]. 본 절에서는 전력선통신 채널의 변화와 부하변동 특성을 측정하기 위하여 능동부하인 조광기(Dimmer-Thyristor Controlled)와 SMPS를 선정하여 실험하였다.

2.2.2 구내용 대용량 전력설비 및 전력선통신을 위한 계속장치 구성 및 측정방안

구내용 대용량 전력설비 및 전력선통신에서의 영향을 미치는 잡음을 분석하기 위하여, 전력케이블에 연계한 부하기기의 동작 및 변동 시 전력선 채널의 현상을 취득하는 장치의 구성이 필요하다. 전력선의 신호인 전압·전류신호를 계속하기 위하여 변성기(PT; Potential Transducer)와 변류기(CT; Current Transducer)를 이용한 회로의 구성이 필요하며, 신호를 취득하기 위한 고속 데이터 수집 장치 ADC(Analog-to-Digital Converter) DAQ(Data Acquisition system) 계속장치가 구성되어야 한다.

아래의 표 1은 계속시스템의 장치사양을 나타내었다. 구성된 계속시스템은 전력선 채널의 특성을 정확히 측정하기 위하여 10MHz/s 고속 샘플링이 가능한 동시 4채널 수집 장치를 사용하였으며, 전력선에 연계되어 전압 신호를 측정하는 변성기의 경우에는 변성비 100:1V 비율로 감압하고 고주파 잡음의 측정용 위하여 별도의 저역통과필터를 구성하지 않았다.

〈표 1〉 계속장치 구성

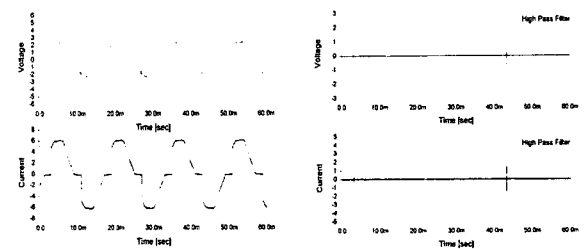
항 목	품 명	용 도	비 고
워크스테이션	Pentium 4 2.8GHz	데이터 저장 및 분석	S-ATA DUAL HDD, 1G RAM
데이터 취득 프로그램	LabVIEW EXPRESS 7.0	실시간 데이터 취득 및 재생	소프트웨어 프로그램 언어
데이터 수집 장치	NI PCI-6115 A DC BOARD	4채널 아날로그 데이터 동시 수집	12Bit 4Channels High RAM 64M Buffer
변성기	LEM CV 3-1000	전압과도현상 측정/계측	Ratio 1000/10V ±1000V Range DC~500kHz(-1dB)
변류기	LEM CT 100-S	전류과도현상 측정/계측	Ratio 100A/5V ±150A Rang DC~250kHz(-3dB)

2.2.3 부하변동에 의한 전송채널의 실측결과 및 분석

부하의 동작 및 변동에 의한 전송채널 특성을 분석하기 위하여 실제 가정 및 사무실 등에서 사용되고 있는 실제 부하들을 대상으로 부하의 동작 및 변동으로 인한 잡음을 실측하였다. 선정된 부하 및 전기기기는 조광기와 SMPS와 같은 전력전자 소자들을 이용한 비선형 부하군으로 특히 스위칭 작용으로 인한 부하의 정상상태 동작 시 임펄스 잡음이 발생하는 부하이다. 또한, 계속된 전압 및 전류신호에 대한 고주파대역의 임펄스잡음 분석하기 위하여, 차단대역이 평탄한(flat) 특성을 갖는 버터워스(Butterworth) 필터를 사용하였으며, 차단 주파수(cut-off frequency)가 200kHz인 4차 고역통과필터(high pass filter)로 부하동작 및 변동에 따른 잡음특성을 분석하였다.

그림 4는 조광기를 이용하여 백열전구의 광도를 “약”에서 “강”으로 변동하여 부하를 측정할 경우를 나타낸 것이며, 측정에 사용된 백열전구는 100W

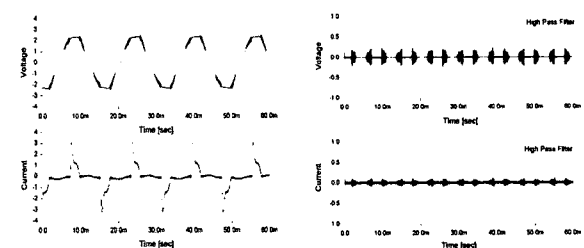
백열전구 10개이며, 총 1KW의 소비전력을 갖는다.



〈그림 4〉 조광기 부하의 실측된 전압, 전류 특성

그림 4에 나타난 바와 같이, 조광기의 SCR에 의하여 스위칭 되는 순간 주기적으로 임펄스 잡음(동기 임펄스 잡음) 성분이 검출됨을 확인할 수 있으며, 스위칭 동작에 따라서 전류성분에서는 전력주파수 60Hz의 정수배에 동기 된 고조파 잡음이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다. 단, 조광기의 소비전력량이 작아짐에 따라 스위칭 시 발생하는 전압성분에서의 임펄스잡음의 첨두값(peak)과 소비전류의 실효값이 감소함을 확인할 수 있다.

그림 5는 일반적인 전자제품의 전원공급 장치로서 이용되는 SMPS 1개를 전력케이블에 연계하여 부하동작 특성을 측정할 것으로, 별도의 부하를 선정하지 않고 사용한 이유는 범용적인 전원장치로서 사용되기 때문이다.



〈그림 5〉 SMPS 부하의 실측된 전압, 전류 특성

그림 5에서 나타난 바와 같이 SMPS 내부에 구성되어 있는 스위칭 컨트롤러에 의한 고속으로 스위칭 작용이 발생하며, 이에 기인하는 주기적 임펄스 잡음(비동기 임펄스 잡음)을 고역통과필터를 통과한 파형(전압, 전류)에서 확인할 수 있다.

2.3 부하변동 특성을 고려한 BER 성능평가

2.3.1 부하변동 특성을 고려한 전력선 통신 모델링

본 절에서는 전력선통신 시스템 상에서 부하변동 특성을 고려하였을 경우의 전력선통신 시스템 모델링과 더불어 전력선통신 시스템 성능분석을 위한 비트오류확률 등에 관한 수학적 분석을 행하였다.

전력선 통신 시스템에서의 이진 디지털 전송 신호를 $b_i \in \{\pm 1\}$ 로 전송하고, 전력선 채널을 통과한 전송신호는 수신단에서 잡음이 추가되며, 수신신호 $r(t)$ 는 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = b_i(t) + n(t) \quad (6)$$

여기서, $b_i(t)$ 는 전송신호이며, $n(t)$ 는 추가된 전력선통신에서의 배경잡음 및 임펄스 잡음을 나타낸다.

수신된 $r(t)$ 는 전송된 신호에 대한 임계값을 비교하여 판정하는 임계치 판정기(Threshold Detector)를 통과하여 수신신호를 판별하고 최종적으로 출력된 데이터에 대하여 가우시안 잡음 및 임펄스 잡음 환경에서의 BPSK를 적용한 오차 확률은 식 (7)과 (8)과 같이 표현할 수 있다[6].

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \quad (7)$$

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (8)$$

여기서, $Q(x)$ 는 가우시안 분포에 관한 에러확률을 표시하기 위해 일반적으로 정의된 상보 에러 함수(complementary error function)이며, 오차확률 P_b 에서의 E_b 는 비트 당 신호에너지이고, N_0 는 잡음 전력 스펙트럼 밀도이다.

2.3.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 전력케이블에 연계된 부하변동에 의한 임펄스 잡음이 통신 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 링크레벨에서 수행되는 몬테카를로 시뮬레이터를 MATLAB으로 구성한 후, 상기 실측된 부하모델의 데이터를 기반으로 BER(Bit Error Rate)성능을 도출하였다. 다음의 표 2는 BER

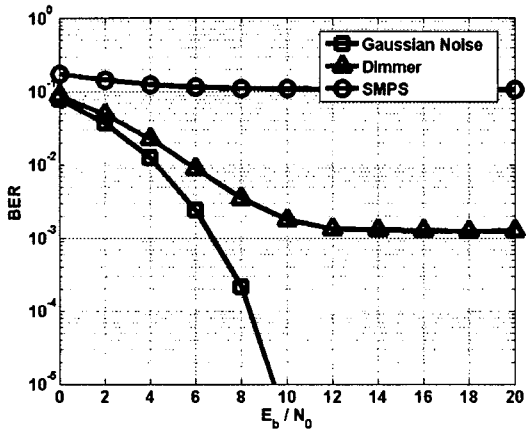
성능을 도출하기 위한 주요 파라미터이다.

[참 고 문 헌]

<표 2> 모의실험을 위한 주요 파라미터

항 목	품 명
부가된 채널	1. 가우시안 잡음 2. 조광기 (주기성-동기 임펄스잡음) 3. SMPS (주기성-비동기 임펄스잡음)
임펄스 잡음 최대 진폭 (Amplitude)	조광기(2.8V _{p-p}), SMPS(0.5V _{p-p})
임펄스 잡음 최대 폭 (Width)	조광기(25 μsec), SMPS(1.3msec)
샘플링 주파수(Fs)	2.6MHz
전송 주파수(fc) 주파수 대역(BW)	1.0MHz 500kHz
변조방식	BPSK (Binary Phase Shift Keying)
전송된 데이터 수	1,000,000 Bit
전송된 데이터 진폭 값	±1V
신호대 잡음비 (Signal to Noise Ratio)	0~20 dB

[1] J. S. Cha, M.C. Shin, J.J. Lee, "A Novel Interference-Cancelled Home Network PLC System Based on the Binary ZCD-CDMA", CIC 2005, Part 2, LNCS 3645, pp.713-722, August 2005.
 [2] Manfred Zimmermann and Klaus Dostert, "Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-Band Power line Communications", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol.44, NO. 1, pp. 249-258, February 2002.
 [3] Meng.H, Chen.S, Guan.Y.L, Law.C.L, So.P.L, Gunawan.E, Lie.T.T, "Modeling of transfer Characteristics for the broadband power line communication channel", Power Delivery, IEEE Trans. Volume 19, Issue 3, pp1057-1064, July 2004.
 [4] Meng.H, Chen.S, Guan.Y.L, Law.C.L, So.P.L, Gunawan.E, Lie.T.T, "A transmission line model for high-frequency power line communication channel", Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on Volume 2, 13-17 October 2002.
 [5] 문경환, 신명철, 이종주, 최상열, 박기욱, 차재상, "새로운 실측 임펄스 잡음 모델을 반영한 채널코딩 기반의 대역확산 전력선 통신시스템", 대한전기학회 제36회 하계학술대회 논문집 A권, pp 72-74, July 18-20, 2005.
 [6] 이문호, "실용 디지털 통신 시스템 기초와 응용", pp81~94, January 2002.



<그림 6> 부하변동 특성을 고려한 비트오율(BER) 성능

본 연구(KECA-2005-11-14-001호)는 한국전기공사협회의 지원에 의하여 수행되었음

그림 6에서는 일반적인 전송로의 배경잡음을 의미하는 가우시안 잡음환경과 전력선통신에서의 부하변동에 따른 임펄스잡음에 대하여 BER 통신성능을 비교 평가한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 일반적인 전송로의 배경잡음인 가우시안 잡음 환경에서는 비트오율(BER) 10⁻³을 기준으로 Eb/N0의 값이 약 7dB로 통신 성능이 원활하게 유지됨을 확인할 수 있으며, 이와는 달리 부하변동에 따른 임펄스 잡음(조광기, SMPS)의 환경에서는 비트오율(BER) 10⁻³을 수렴하지 못하고 Eb/N0의 값이 발생되어 상당히 일정한 통신 성능을 확인할 수 있다.

이와 같은 모의실험을 통해 전력케이블에 연계된 부하들의 동작 및 변동에 따른 임펄스 잡음이 통신성능에 미치는 영향을 알 수 있었으며, 본 모의 실험에서 적용한 임펄스 잡음의 진폭은 가우시안 잡음의 진폭과 수신된 신호의 진폭에 비해 상대적으로 큰 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 구내용 전력케이블기반의 UWB 통신용 채널특성분석을 위하여 구내용 전력케이블 및 전력선의 임피던스특성으로 주파수대역에 따른 신호의 감쇠정도를 구분하였다. 선로의 정확한 모델링을 위하여 수용가와 구내에 사용되는 전력케이블의 선로정수를 활용하였으며, 이를 통하여 본 논문에서는 전송주파수 1MHz에 전송대역 500kHz인 전송신호를 모의하여 전력선통신 성능을 평가하였다.

통신성능 평가는 모의된 전송선로의 임피던스 특성을 반영한 신호의 감쇠를 적용하였으며, 잡음환경에 따른 통신성능평가를 위하여 가우시안 잡음환경과 실측한 부하인 조광기, SMPS 구동시의 잡음환경을 적용하였다. 수행한 시뮬레이션을 통하여 보다 정확한 통신환경을 모의하기 위해서는 다양한 부하의 선경과 이에 따른 실측기반의 전압, 전류신호의 계측이 필요하고, UWB 대역의 통신을 모의하기 위하여 광대역의 고속 실측이 필요하다.

또한, UWB 대역의 전송주파수 특성 평가를 위하여 구내용 전력케이블과 전력선의 매질에 대한 임피던스 특성평가가 필요한 것을 확인하였다.

따라서 본 논문에서 제안한 구내용 전력케이블기반의 UWB 통신용 채널 특성분석 방식을 활용하여 다양한 부하변동에 따른 실측과 고속의 채널 데이터 수집 및 정확한 매질특성 모델링을 통하여 광대역전력선 통신의 성능 평가 및 특성을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.