

RF Channel Characteristics of the Medium-voltage Power Line for PLC

金 宜 孝* · 金 觀 鎬** · 李 永 哲*** · 愼 哲 宰§
 (Seon-Hyo Kim · Kwan-Ho Kim · Young-Chul Rhee · Chull-Chai Shin)

Abstract - In this paper, the channel characteristics of the medium voltage(22.9kV) power line to analysis the broadband power line communication in the frequency range up to 30MHz was measured. With the wideband electrical coupler in the operating frequency range from DC to 30MHz, we measured characteristic impedance, noise and attenuation of the medium voltage power line, and then characteristic impedance was measured at the state of unloaded medium voltage power line by Scattering parameter method of Vector Network Analyzer. As a measurement result, Channel impedance shows 100~380Ω at the less than 15MHz and 70~230Ω at the more than 15 MHz. Noise characteristics of power line shows -75dBm at 20MHz and Narrowband interference noise was from 3 MHz to 7MHz.

Key Words : RFI(Radio frequency interference).

1. 서 론

고속 대용량의 데이터를 전송하기 위한 목적으로 통신의 발달은 점점 가속화 되고 있다. 특히 인터넷 사용 인구가 증가함에 따라 데이터 통신의 발전은 더욱더 중요하게 되어 가고 있으며 통신의 전송 매개체 선정 방법도 여러 가지가 제시되고 있는 실정이다. 따라서 채널의 특성을 이해하는 것은 통신에 있어서 가장 중요한 것이다. 특히 전력선을 통한 통신선로의 개발은 원격검침 등을 비롯한 여러 가지 분야에 적용됨으로써 관심이 증가되고 있으며 여러 가지 방법에 의한 데이터 전송속도 향상의 개발로 연구되고 있다. 데이터 통신에 필요한 전력선의 중요한 파라메타는 잡음특성, 신호감쇠, 임피던스 등이다. 전력선은 데이터 전송을 목적으로 만들어진 전송선로가 아니기 때문에 데이터 손실, 회선파의 간섭, 잡음, 부하저항, RFI 등으로 인한 많은 변화가 발생할 수도 있다.[3] 그 중에서 전력선의 임피던스 특성은 주파수변화에 따라 많이 변화 할 뿐만 아니라 측정위치에 따라 특히 전력선의 부하변동 등의 파라메타들에 의해 변화하며 대체로 그 값은 수 Ω에서 수십 kΩ까지이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 전력선에 대한 정확한 기준값이 필요하다. 본 연구에서는 전력선의 채널특성에 대한 기준 데이터 값을 확인하고자 완전 무부하 상태의 환경적 조건에서 전력선의 RF특성을 측정함으로써 광대역 통신

을 위한 전력선 채널특성시험을 하고자 하였다. 저 전압용 전력선의 채널 특성에 관한 연구는 1973년에 처음으로 AC 전력 출력단의 임피던스 측정에 대하여 연구결과를 발표한 것을 시작으로 주파수 500KHz에서 500MHz의 범위에서 전력선 임피던스 측정 기술까지 제시되었다.[1][2] 이들은 모두 전류 probe 법으로 측정되었기 때문에 측정하는 데에 있어서 많은 어려움이 따르며 주파수가 높을수록 오차도 많이 발생할 수 있는 단점이 있다. 한편 중 전압용 전력선에서의 채널특성에 관한 연구는 Hensen^[6]이 중 전압에서의 선로 특성을 측정하기 위하여 선로의 변수를 표피효과를 고려하여 계산하고 각 변수를 길이에 따른 R,L,G,C의 값의 크기를 측정하여 선로의 감쇠상수와 임피던스를 계산하였다. 그러나 이 방법은 낮은 주파수에만(0~2MHz)적용할 수 있으며 높은 주파수에서는 측정이 불가능하다. 본 연구에서는 낮은 주파수에서 높은 주파수범위 까지 측정할 수 있는 s-파라메타법을 이용한 측정법을 사용하였으며 Kwasniok^[2]가 주어진 임피던스를 이용하여 모의실험 하여 비교하였다. 그리고 본 연구에서는 광대역 통신에 필요한 중 전압용 전력선의 채널특성을 파악하고자 무부하 상태로 22.9kV 60Hz 가 인가되어있는 삼상의 중전압 전력선이 설치되어있는 옥외시험장에서 측정을 하였으며 측정조건은 전력선에 직접 22.9 kV용 결합기를 연결하여 전력선의 특성 임피던스 측정과 잡음크기 및 감쇠크기를 측정하고 이를 분석하였다.

2. 표피효과를 고려한 전력선의 채널 전달함수와 임피던스

전력선로 방식은 금속귀로 방식과 대지귀로 방식으로 크게 분류할수 있으며 본 연구에서는 대지귀로 방식을 이용하

* 正 會 員 : 거창 技能大學 副教授
 ** 正 會 員 : 韓國電氣研究院(KERI) 責任研究員
 *** 正 會 員 : 慶南大學教 情報通信 工學部
 § 正 會 員 : 아주大 電氣工學科 教授
 接受日字 : 1998年 5月 8日
 最終完了 : 1998年 6月 15日

었다. 전력분포망은 망 구성 형태의 종류에 따라 다음과 같다. 첫째로 망 구성에 있어서 가장 단순하고 경제적으로 가장 저렴하지만 선로 단선시 복구에 장시간이 소요되는 방사형(Radial network)과 둘째로 방사형을 개선하여 접속점을 이중화한 원형(Ring network)이 있으며 셋째로 원형의 망형태를 저 전압망에서 상호 연결한 그물망형(Meshed network)이 있다. 본 연구에서는 원형의 개방원 형태를 이용하였다. 중 전압 전력선망(10kV~100kV)은 고 전압 전력선망(100kV 이상)과 저 전압전력선망(0~10kV) 과의 사이에 연결된 것으로서 380V로 감소되어 각 가정으로 분배되어진다. 그림 1은 개방원 중 전압 전력선망의 구성도 이다.

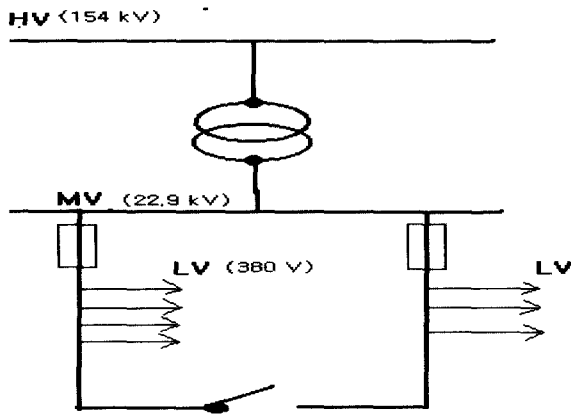


그림 1 개방원 중 전압 전력선망
Fig. 1 Open ring medium voltage power-line network

광대역 전력선 통신에서는 높은 주파수의 전송이 필요함에 따라 전력선의 표피 효과를 고려하여야 한다. 중 전압 전력선의 모델링은 π 형태로 등가화 했다. 단위길이에 따른 컨덕턴스 G와 저항 R는 주파수에 의존적이다. 단위길이에 따른 저항 R는 표피효과로 인해 주파수와 더불어 증가하지만 컨덕턴스 G는 주파수가 높을 경우에는 R와 L의 성분으로 구성되어 대체되어진다. 중 전압 전력선의 등가회로와 표피 효과를 고려한 중 전압 전력선의 등가회로는 그림 2와 같다.

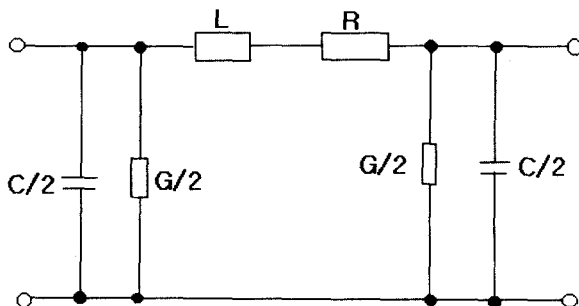


그림 2 (a) 중 전압 전력선망의 등가회로
Fig. 2 (a) Equivalent circuit of medium voltage power line

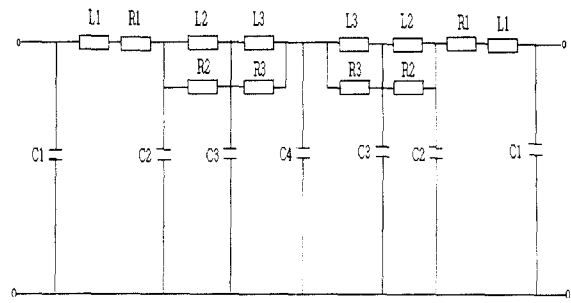


그림 2 (b) 표피효과를 고려한 중 전압 전력선 망의 등가 회로
Fig. 2 (b) Equivalent circuit of medium voltage power line with skin effect

전송선로를 등가회로로 분석했을때의 특성 임피던스 Z_L 과 전파상수 γ 를 표현하면 다음과 같다.[6]

$$Z_L = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (2)$$

표피효과를 고려한 중 전압 전력선의 단위길이 당 레지스턴스(R), 컨덕턴스(G), 인덕턴스(L),그리고 커패시턴스(C)는 각각 다음과 같다.

$$R = \frac{\rho_1}{\pi \cdot d \cdot t_1} + \frac{\rho_2}{\pi \cdot D \cdot t_2}$$

$$G = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{D}{d}} \cdot \tan \delta$$

$$L = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D}{d}$$

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{D}{d}}$$

여기서 D는 단일코어 케이블의 외부도체 반경이고 d는 내부도체의 반경이다. ρ_i 는 저항율이며 t_i 는 침투깊이로써 다음과 같이 계산되어진다.

$$t_i = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_i}{\omega \cdot \mu_0}} \quad (3)$$

정합된 전송선로를 고려하여 전력원(송신부)에서부터 목적지(수신부)까지 전파 전달을 동등하게 간주하면, 길이가 l 인 선로에서의 전달 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(f) = \frac{V(x=l)}{V(x=0)} = e^{-\gamma \cdot l} = e^{-\alpha(f) \cdot l} e^{-j\beta(f) \cdot l} \quad (4)$$

그림 2의 구성도를 일반적인 전력선통신에 사용되는 채널로 나타내면 그림 3과 같다.

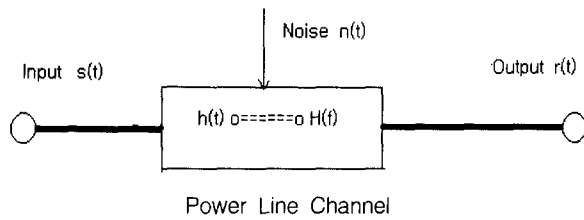


그림 3 전력선의 채널 모델
Fig 3 Channel model of power line

전력선 손실에 의해 발생하는 감쇠는 주파수와 길이 및 다중경로 전파에 따라 달라지는 것으로서 설명할 수 있다. 전파상수 $\gamma = \alpha + j\beta$ 에서 전력선의 감쇠 α 는 다음과 같이 표현 할 수 있다 [3]

$$\alpha(f) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot f^k \quad (5)$$

여기서 α_0, α_1 는 감쇠 파라메타이고 k 는 감쇠상수로써 0.2~1 사이의 값이다. 전력선에 다중경로의 전송신호가 전송될 경우에는 식(4)의 전달함수는 다음과 같다.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) l_i} \cdot e^{-2\pi j f \tau_i} \quad (6)$$

여기서 i 는 경로의 수이고 g_i 는 i 번째 경로에 대한 신호의 크기이며 τ_i 는 경로 i 번째의 지연시간으로 채널길이에 따른 위상속도이다. 전력선에 다중경로 신호가 전송되는 경우에는 신호가 지연되고 또한 감쇠가 발생하기도하며 심할 경우에는 에코현상까지 발생하게 되는데 다중경로에서의 임펄스응답 $h(\tau)$ 를 표현하면 다음과 같다.

$$h(\tau) = \sum_{v=1}^N |\rho| \cdot e^{j \cdot \phi} \cdot \delta(\tau - \tau_v) \quad (7)$$

기서 $|\rho|$ 는 크기, ϕ 는 위상 그리고 τ 는 지연을 의미하며 각 경로는 3가지의 파라미터로 설정되어지기 때문에 N 경로를 가지는 전력선의 채널은 $3 \cdot N$ 개의 파라미터로 정의될 수가 있으며 크기,지연,위상을 갖는 이산 임펄스 응답으로 고려되어진다. 전력선 통신에서 전력선로의 잡음은 배경잡음이 97% 이상을 차지하며 이것은 선로에서 항상 나타나는 것으로서 주파수가 증가할수록 잡음레벨이 감소하는 특성을 나타내며 잡음전력 스펙트럼 밀도(PSD)가 주파수에 의존하는 것으로 보인다. 배경잡음은 다음과 같다 [7]

$$N(f) = 10^{(k - 3.95 \cdot 10^5 \cdot f)} \quad (8)$$

기서 k 는 평균적인 가우시안 랜덤변수로써 최악의 조건일 경우에는 $k = \mu + 2\sigma$ 이며 최상의 조건일 경우에는 $k = \mu - 2\sigma$ 의 값을 가지며 평균값 $\mu = -8.64$ 이고 표준

편차 $\sigma = 0.5$ 의 값을 갖는다. 임펄스 잡음은 단일 전송신호인 임펄스 잡음과 다중 전송신호인 임펄스 잡음의 2종류로 분류할 수가 있다 [8]. 단일 전송신호인 경우 임펄스 잡음을 시간영역에서 보면 다음과 같다.

$$H(t) = A_p \cdot \exp^{(-f_0 \cdot t/4)} \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t) \cdot \text{rect}(t/T_p) \quad (9)$$

다중 전송신호인 경우 임펄스 잡음을 시간영역에서 보면 다음과 같다.

$$H(t) = A_p \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t) \cdot \text{rect}(t/T_p) \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} \text{rect}(t/T_p) &= 1 \quad (0 \leq t \leq T_p) \\ \text{rect}(t/T_p) &= 0 \quad (\text{위의 조건이 아닐 경우}) \end{aligned}$$

이며 T_p 는 발진의 주기로써 $T_p = 4/f_0$ 이며 A_p 는 진폭의 크기이다. 60Hz 동기잡음은 시간영역에서 잡음 임펄스 형태로 나타나며 매초 도착되는 시간은 $\frac{1}{(K \cdot f_{net})}$ 로 나타나며 여기서 $K=1$ 또는 $K=2$ 이다. 임펄스잡음과 같이 큰 잡음은 아니며 단지 배경잡음 크기가 적을 때 나타난다. 협대역 잡음은 주어진 주파수 대역에서 좁은 부분의 주파수 범위를 갖는 것으로서 대부분 저주파 범위에서 발생되며 협대역 잡음도 배경잡음 크기가 적을 때 나타난다. 선로길이 l 를 갖는 전력선 임피던스 Z_L 은 다음과 같다 [2]

$$Z_L = \frac{(K_{R1} Z_{T2}) \left(\frac{V_{P1}}{V_{P2}} \right) \cos(\beta l) - Z_{in}}{1 - j(K_{R1} Z_{T2}) \left(\frac{V_{P1}}{V_{P2}} \right) \frac{\sin(\beta l)}{Z_0}} \quad (11)$$

여기서 V_{P1} 은 벡터 회로망분석기(Vector Network Analyzer) 단자 1에서 발생하는 입력신호의 크기이며 V_{P2} 는 단자 2에 수신되는 신호의 크기이고 β 는 위상상수이다.

벡터 회로망분석기의 단자1 (VP_1) 과 단자2 (VP_2) 각각의 전압비율은 다음과 같다.

$$\frac{V_{P1}}{V_{P2}} = \frac{1 + S_{11}}{S_{21}} \quad (12)$$

여기서 $K_{R1} Z_{T2}$ 은 출력 파라메타로써

$$(K_{R1} Z_{T2}) = \frac{Z_{in} + Z_L}{\left(\frac{V_{P1}}{V_{P2}} \right)}$$

이며 Z_{in} 은 입력 임피던스이다.

3. 전송특성 모의실험 및 측정결과 분석

측정은 특수용 세라믹 콘덴서를 사용하여 설계, 제작된

22.9kV용의 결합기를 이용하여 무부하 상태에서 옥외 시험장에서 실시를 하였다. 사용주파수 범위는 0~30MHz로 하였으며 그림 4(a), 그림 4(b)는 전력선 통신을 위한 중 전압용 전력선의 실험 구성도 이다. 측정에 사용한 계측기는 hp사의 3577A NETWORK 분석기 와 E4404B SPECTRUM 분석기이다. 중 전압용 전력선에 사용한 선로는 H ACSR OC 95x3 , N ACSR 58x1 이다. 그림 5(a)는 Matlab을 이용한 모의실험 결과를 출력스펙트럼으로 나타난 것이다. 식 (5)와 (6)에서 모의실험에 사용된 파라메타는 표 1과 같으며 채널길이별 4회 측정으로 경로수 N=4 로 하였으며 N=4에 대한 크기계수는 표 1 과 같이 $g=0.4, -0.4, -0.8, -1.5$ 와 $k=0.5, a_0=0, a_1=8 \times 10^{-6}$ 이다 [3]

표 1 모의실험 파라메타

Table 1 Simulation parameter

경로수	1	2	3	4
지연(us)	1.0	1.25	1.76	2.64
채널길이(m)	10	20	30	50
크기계수(g)	0.4	-0.4	-0.8	-1.5

$k = 0.5, a_0 = 0, a_1 = 8 \times 10^{-6}$

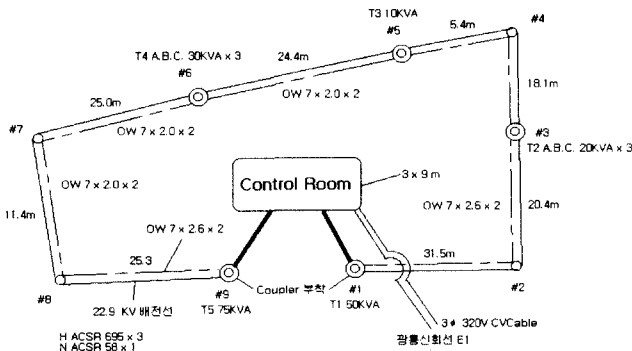


그림 4 (a) 옥외시험장 구성도
Fig. 4 (a) Diagram of outdoor test field

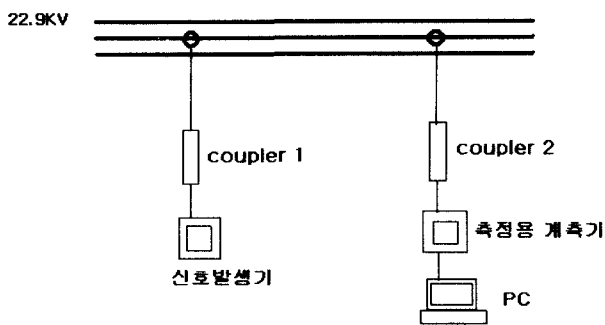


그림 4 (b) 전력선의 실험 구성도
Fig. 4 (b) Diagram of power-line measurement

모의실험 결과를 그림 5(b)의 실제 측정된 출력스펙트럼과 비교하면 협대역 간섭 잡음을 제외하면 유사한 측정값을 갖는 것을 확인 할 수가 있다. 그림 5(b)의 잡음특성 그래프는 전력선에 22.9kV 60Hz가 인가된 상태에서 0~50MHz까지의 범위에서 CW 신호를 입력하여 나타난 출력파형의 그래프로써 주파수가 증가할수록 잡음의 크기도 전체적으로 감소함을 알 수가 있으며 협대역 간섭잡음 발생은 대체로 500kHz~1MHz 와 3MHz~7MHz 사이에서 크게 발생함을 볼 수가 있다.

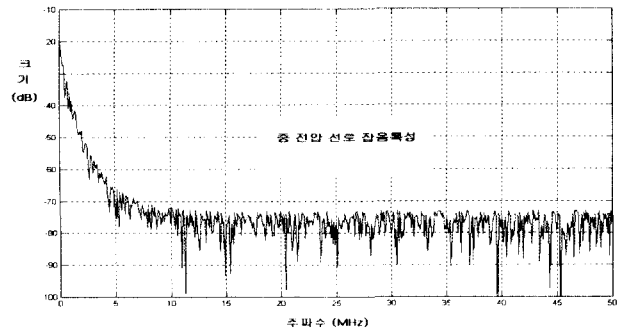


그림 5 (a) 모의실험을 이용한 출력 스펙트럼
Fig. 5 (a) Output spectrum with simulation

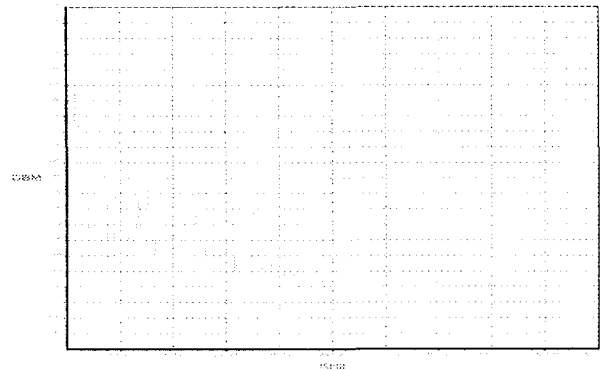


그림 5 (b) 측정된 출력스펙트럼
Fig. 5 (b) Measured output spectrum

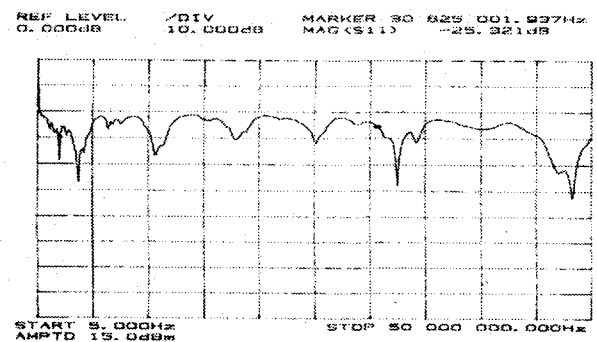


그림 6 중전압 전력선로의 S₁₁ 파라메타
Fig. 6 S₁₁ parameter of medium voltage power-line

전력선의 임피던스는 Network 분석기에 의한 s-파라메타의 S_{11} 값의 측정으로 계산되어진다. 그림 6은 중 전압 전력선의 s_{11} 값을 나타내고 그림 7은 임피던스의 크기를 나타내는 그래프로써 0 ~15 MHz 까지는 임피던스 크기가 대체로 크며 15 MHz 이상의 주파수에서는 크기가 대체로 적음을 알 수가 있으며 주파수가 증가함에 따라 임피던스 크기가 점점 감소함을 알 수가 있다. 그리고 주파수가 높을수록 임피던스의 변화량이 많음을 알 수가 있다.

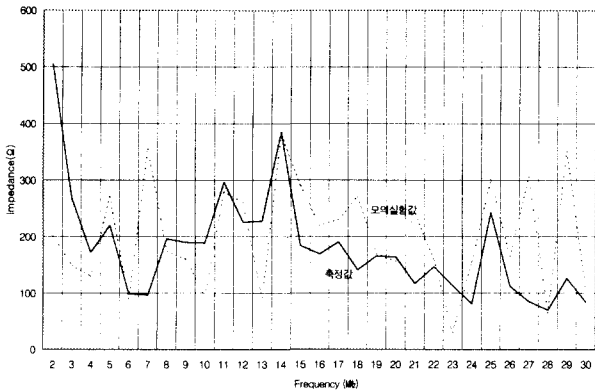


그림 7 중전압 전력선의 임피던스 크기
Fig. 7 Impedance magnitude of Medium-Voltage Power-Line

그림 8. (a)은 모의실험을 이용한 전력선로의 감쇠특성 그래프로써 채널길이가 증가할수록 감쇠가 증가함을 알 수가 있다. 그림 8. (b)는 전력선 길이 50m를 기준으로하여 실제 측정된 감쇠특성 곡선으로써 0~18MHz 까지는 급격한 변화가 있음을 알 수가 있다. 또한 그래프에서 주파수가 증가할수록 감쇠가 증가함을 알 수가 있으며 0~3MHz 일때는 평균감쇠 10~20dB 이며 3MHz~18MHz 일때는 20dB~50dB 이고 18MHz~25MHz 일때는 50dB~65dB이며 25MHz 이상일때는 60~70dB의 일정한 값을 갖는 것을 확인할 수가 있다.

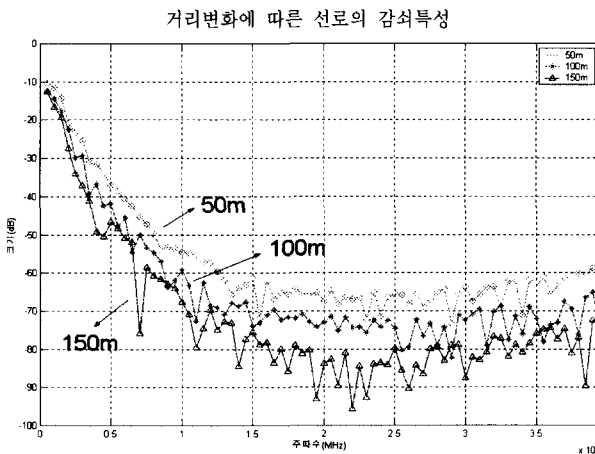


그림 8 (a) 모의실험을 이용한 감쇠특성
Fig. 8 (a) Attenuation with simulation

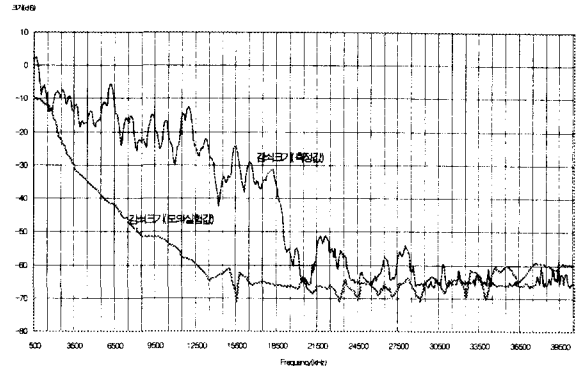


그림 8 (b) 측정된 감쇠특성
Fig. 8 (b) Measured attenuation characteristics

4. 결 론

본 연구에서는 주파수 0~30 MHz까지의 범위에서 중 전압용 전력선의 RF 특성을 확인하고자 하였다. 중 전압 전력선의 출력 스펙트럼 파형에서는 22MHz 이하의 주파수에서는 잡음특성의 변화가 심하게 나타남을 알 수가 있으며 특히 저주파수에 가까워 질수록 잡음이 심하게 나타남을 알 수가 있다. 또한 22MHz 이상의 주파수에서는 대체로 감쇠의 크기가 동일하며 잡음도 적게 나타남을 볼 수가 있다. 그리고 중 전압 전력선의 경우 20MHz 이상에서는 -75dBm의 잡음 특성을 볼 수가 있기 때문에 저 전압 전력선에서 보다 잡음 특성이 우수함을 알 수가 있다. 임피던스의 크기도 대체적으로 주파수가 높아짐에 따라 점점 낮아져가는 형태의 그래프를 볼 수가 있다. 실제로는 주파수에 대한 선택적 페이딩이 발생하게 되고 각종 기기의 접속에 따른 부하량의 변화에 따른 잡음특성 및 임피던스의 변화량 까지도 고려하여 적용하여야 하기 때문에 적응적 임피던스 어댑터가 필요할뿐만 아니라 특히 광대역 통신에서 전력선에 고주파수의 신호가 전송시에는 전송선로 자체가 안테나 역할과 같은 기능을 할 수도 있기 때문에 향후 EMI, EMC 등의 문제까지 연구가 지속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. R. Nicholson and J. A. Malack, "RF impedance of power-lines and line impedance stabilization networks in conducted interference measurements," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.1 EMC-15, no.2, pp. 84-86, May 1973.
- [2] P. J. Kwasniok, M.D. Bui, Kozlowski, and S. S. Stuchly, "Technique for measurement of power line impedances in the frequency range from 500Khz to 500Mhz", IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, vol. 35, No. 1, Feb 1993.
- [3] Manfred Zimmermann, Klaus Dostert, "A Multipath Signal Propagation Model for the power line

Channel in the High Frequency Range," (ISPLC '2000)

[4] Olaf G. hooijen and A.J Han Vinck, "On theChannel Capacity of a European-style Residential Power Circuit" (ISPLC '98).

[5] E. Yavuz. F. Kural, N. Coban, B. Ercan andM. Safak, "Modeling of Power lines for digital Communi-cations,"(ISPLC2000) pp161-168

[6] Christian Hensen, Dr. Wolfgang Schulz, Sascha Schwarze, "Characterisation, Measurement and Modeling of Medium Voltage Power-line cables for High Data Rate Communication," (ISPLC '1998)

[7] R. M. Vines etal., "Noise on residential power distribution circuits," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.26, No.4, pp. 161-168, November 1984.

[8] Michel ROUSSEAU, Patrick MOREAU, 'Character-ization and optimization of multicarrier- technoligies over PLC channel," (ISPLC2001) pp299~304.

저 자 소 개



김 선 효 (金 宣 孝)

1985년: 경남대학교 전자공학과(공학사).
 1987년: 아주대학교 전자공학과(공학석사).
 1999년: 아주대학교 전자공학과(박사과정 수료).
 1988~1992년: 삼성전자(주).
 1993~1995년: 부일이동통신(주).
 1995~현재 : 거창기능대학 부교수



이 형 철 (李 永 哲)

멜본대학교 객원연구. 1983~현재: 경남대학교 정보통신공학부 교수.

김 관 호 (金 觀 鎭)

현재: 한국전기연구원 전략기술연구단 정보,광응용 연구그룹 책임연구원. 이영철1988~1990.2:



신 철 재 (愼 哲 宰)

1964년: 연세대학교 전자공학과(공학사).
 1968년: 연세대학교 전자공학과(공학석사).
 1983년: 연세대학교 전자공학과(공학박사).
 1967~1970년: 동양공업전문대 조교수.
 1970~1977년: 광운대학교 조교수.
 1986~1987년: 미국 Florida대학 객원교수.
 1977~현재 : 아주대학교 전자공학과 교수