

## A Study of Electromagnetic Interference in Power Line Communication

李 眞 澤<sup>†</sup> · 千 東 完<sup>\*</sup> · 朴 永 鎭<sup>\*\*</sup> · 李 垣 泰<sup>\*\*</sup> · 愼 哲 宰<sup>\*\*\*</sup>

(Jin-Taek Lee · Dong-Wan Chun · Young-Jin Park · Won-Tae Lee · Chull-Chai Shin)

**Abstract** - In this paper, we studied the emissive electric field due to the communication signal and the noise in medium voltage power-line. There are many types of conductive noise in power-line channel, which gives rise to radiation. And if the DMT carrier signal was excited, the current by this term was added to the current by noise and, generate radiation. We calculated input impedance by means of signal input network model of medium voltage power-line channel for calculating these currents. We calculated currents by input impedance and, calculated the emissive electric field by this calculated currents. From the measurement results, we knew that the measured results are very similar to the calculated results and if the input signal power level was higher than -40 dBm, the emissive electric field exceeds FCC radiation limit level 69.5 dB $\mu$ V/m.

**Key Words** : PLC (Power-Line Communication), Conductive Noise, DMT, Emissive E-Field

### 1. 서 론

전력선통신(PLC; Power-Line Communication)은 전력선을 통신채널로 사용하는 통신시스템으로써 별도의 추가비용 없이 통신망의 구성이 가능하고, 전력선이 연결된 곳이라면 어디서든 통신이 가능하다는 점에서 가장 이상적인 통신시스템이라 할 수 있다. 이러한 장점들 때문에 PLC 통신에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 상태다.[1]~[10] 전력선은 통신을 위해 설치된 것이 아니기 때문에, 전력선상의 높은 감쇠와 잡음 신호등을 고려하여야 하며 현재는 신호의 감쇠나 잡음을 극복하기 위해 전송 전력을 높이려 하는 추세에 있다. 그러나 전송 전력의 상승은 방사전자파의 증가를 야기하게 되고, 이로 인해 타전자파 이용설비와 기존에 사용되는 통신시스템과의 간섭문제뿐만 아니라 전자파 환경성 문제를 발생시킨다. 그러므로 전력선 통신이 기술적 안정성과 신뢰성을 가지기 위해서는 이미 규정되어 있는 사용 주파수대역에서 타전자파 이용 설비와의 전자파 환경성 문제해결이 선행되어야 한다. 전력선통신은 다중반송전송(multi-carrier)으로 인해 데이터의 고속전송이 가능하게 되었고, 현재 DMT(Discrete Multi-tone)방식을 이용하여 상용화가 진행되고 있다.[1]~[3] 전자파를 이용하는 기기들이 많아짐에 따

라 국가나 단체별로 방사되는 전자파의 최대치를 규정하고 있다.[5] 따라서 전력선으로부터 방사되는 전자파의 크기를 규제함으로써, 전송전력을 제한하여야 한다.

본 논문에서는 현재 상용화 진행중인 22.9 KV의 고압 선로에 대한 DMT 통신방식에서 전력선으로부터 발생하는 방사전자파의 전계를 계산 및 측정을 해보았다. 전송 전력이 높아지게 되면 양호한 SNR을 확보할 수 있으나, 방사되는 전자파의 세기 역시 증가하게 되므로 전자파 장애 규정인 FCC의 방사 제한치를 초과하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 고압 전력선을 모델링하고 이를 바탕으로 신호입력단의 임피던스를 유도하여 DMT 신호에 의해 전력선에 흐르는 전류를 계산하였다. 그리고 전도성 잡음과 계산된 전류를 이용하여 전력선으로부터 3 m지점에서 방사되는 전계를 입력신호의 전력에 따라 계산함으로써 통신이 가능한 신호대 잡음비를 만족하는 최소전력에서부터 FCC의 전자파 장애 규정인 69.5 dB $\mu$ V/m를 만족하는 최대전력의 크기를 규정하였다.

### 2. 전력선의 채널모델링

배전에 대부분을 차지하는 ACSR(aluminum cable steel reinforced) 선로는 알루미늄 코어에 6가닥의 철심으로 보강이 되어있으며 철심을 포함한 전체 반지름은 5.25mm 이다. 표피두께(skin depth)가 매우 작고, 과장이 반지름에 비해 매우 길기 때문에( $\lambda = 12.5m @22 \text{ MHz}$ ) ACSR 선로를 반지름 5.25mm 의 원통형 도체에 피복이 씌워진 선로로 보아도 무방하다. 전력선통신에 금속커로방식을 적용할 경우 하나의 전력선은 신호 선으로 쓰이고 다른 하나는 접지선으로

† 교신저자, 正會員 : 亞州大 情報通信大 電子工學科 博士課程

E-mail : ljtl234@ajou.ac.kr

\* 正會員 : 亞州大 情報通信大 電子工學科 博士課程

\*\* 正會員 : 韓國 電氣研究院 研究員

\*\*\* 正會員 : 亞州大 情報通信大 電子工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 7月 5日

最終完了 : 2004年 11月 15日

이 전송선로의 R, L, G, C를 식(1)에 나타내었다. 저항 및 인덕턴스는 유전율과 무관하기 때문에 식(1)을 바로 적용하여 계산할 수 있으며 G, C는 유전율과 상관이 있기 때문에 유효 유전상수를 따로 계산하여 적용하여야 한다.

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{1}{\pi a} \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}} [\Omega/m] \\
 L &= \frac{\mu_0}{\pi} \cosh^{-1}(D/2a) [H/m] \\
 G &= \frac{\pi \omega \tan \delta \epsilon_r \text{eff} \epsilon_0}{\cosh^{-1}(D/2a)} [S/m] \\
 C &= \frac{\pi \epsilon_r \text{eff} \epsilon_0}{\cosh^{-1}(D/2a)} [F/m] \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)에서 a는 도체의 반지름, D는 선로사이의 거리,  $\epsilon_r \text{eff}$ ,  $\sigma$ ,  $\tan \delta$ 는 각각 선로의 유효 유전상수, 도전율, loss tangent를 나타낸다. 식 (1)에서 계산한 R, L, G, C 값을 이용해 전송선로의 특성 임피던스 및 손실을 계산하면 식 (2)와 같다.

$$\alpha_{cd} = \frac{1}{2} \left( \frac{R}{Z_0} + GZ_0 \right), \quad Z_0 \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

측정에 사용한 ACSR 선로의 유전체 코팅 두께는 약 3 mm이며, 유전상수가 약 2.3 임을 감안하면, 특성임피던스는 약 554Ω 정도의 값을 가짐을 알 수 있다.

### 3. DMT 방식의 전력선 통신

현재 고압 전력선을 이용한 전력선통신은 그림 1. 과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 전력선의 특성임피던스는 앞에서 구한 554Ω을 사용하였다. 실제 전기신호가 흐르고 있는 전력선의 일부분을 택하여 통신 선로로 사용하며 75Ω의 동축선로를 이용하여 DMT 신호를 전력선에 인가하게 된다. 이 때 전력선의 전도성잡음은 모든 주파수대역에 걸쳐 존재하게 되며, 이것은 방사 원인으로 작용하여 주파수대역 전 구간 에 걸친 방사전자파를 유발하게 된다. 그림 1. 에서 보는 바와 같이 DMT 통신을 위해 설정된 두 전진주의 양쪽으로 연속적인 전력선이 존재하고 시간 및 지역에 따른 부하의 변화를 예상할 수 있다. 따라서 연속적으로 분배된 전력선과 부하의 임피던스를  $Z_{var}$ 로 표시할 수 있다. 그림 1.로부터  $Z_{in1}$ 은 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. 여기서  $l_p$ 는 전력선의 길이이고  $\gamma_p$ 는 앞에서 계산된 감쇠상수를 포함한 전송상수이다.

$$Z_{in1} = Z_{0p} \frac{Z_{var} + Z_{0p} \tanh(\gamma_p l_p)}{Z_{0p} + Z_{var} \tanh(\gamma_p l_p)} \quad (3)$$

$Z_{in3}$ 를 계산하면 동축선로의 특성임피던스가 75Ω, 모델의 포트 임피던스가 50Ω 이기 때문에 식 (4) 및 (5)와

같이 나타낼 수 있다.

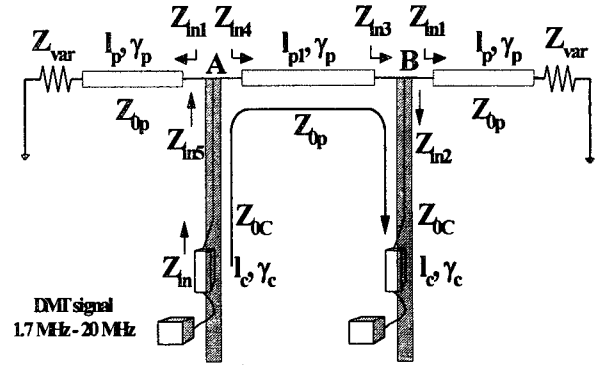


그림 1. 전력선통신의 구성도

Fig. 1. Fabrication of power-line communication.

$$Z_{in3} = Z_{in1} / Z_{in2} \quad (4)$$

$$Z_{in2} = 75 \frac{50 + 75 \tanh(\gamma_c l_c)}{75 + 50 \tanh(\gamma_c l_c)} \quad (5)$$

식 (5)에서  $\gamma_c$ 와  $l_c$ 는 선로의 전파상수 및 길이이다.  $Z_{in4}$ 는  $Z_{in1}$ 과 마찬가지로 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$Z_{in4} = Z_{0p} \frac{Z_{in3} + Z_{0p} \tanh(\gamma_p l_p)}{Z_{0p} + Z_{in3} \tanh(\gamma_p l_p)} \quad (6)$$

A 지점에서 좌측을 바라보는 임피던스는  $Z_{in1}$ 과 같으며 동측 선로에서 바라본 임피던스는 식 (7)과 같으며, 최종적으로 모델에서 바라본 입력임피던스는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{in5} = Z_{in1} / Z_{in4} \quad (7)$$

$$Z_{in} = 50 \frac{Z_{in5} + 50 \tanh(\gamma_c l_c)}{50 + Z_{in5} \tanh(\gamma_c l_c)} \quad (8)$$

### 4. 전력선상의 전도성 잡음 및 전류

전력선의 흐르는 전류는 두 가지로 생각할 수 있다. 주파수대역으로 할당된 9 kHz~30 MHz 사이에 존재하는 전도성잡음 (Conductive noise)에 의한 전류 및 통신을 위해 인가되는 DMT신호에 의해 발생하는 전류가 있다. 따라서 전력선 상에 존재하는 전류는 전도성 잡음에 의한 전류 및 DMT 신호에 의한 전류의 합으로 나타낼 수 있다.

전력이 발전소로부터 최종 수용가에 전달되는 과정에서 전력선에 접속하는 부하들의 변동에 따른 임피던스의 정합이 이루어지지 않기 때문에 필연적으로 신호의 반사와 왜곡이 발생하게 된다. 그리고 부하들에 의해 발생하는 전기적 신호가 전력선으로 유입되는 경우, 이 신호들은 잡음으로 작용하게 된다. 전력선상에 존재하는 전도성 잡음은 환경의 영향으로 발생하는 배경 잡음, 낙뢰나 순간적인 개폐에 의한

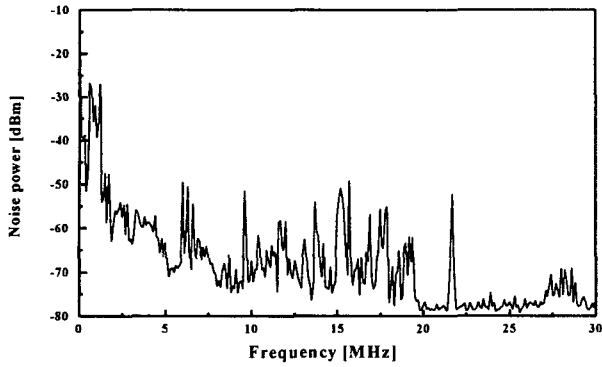


그림 2. 측정된 전력선의 전도성 잡음  
Fig. 2. Measured Conductive noise of power-line.

충격잡음, 기기내의 안정회로의 영향으로 전력주파수 60 Hz에 동기되거잡음, 기기내의 안정회로의 영향으로 전력주파수 60 Hz에 동기되어 발생하는 동기잡음, 과도 현상에 의한 썬어지 유입시 발생하는 100 MHz의 과도시 잡음(transient noise), 안테나로 동작하여 타전자기파를 흡수하여 좁은 주파수 대역에 걸쳐 발생하는 협대역잡음 등으로 정의할 수 있다.[10] 전력선 잡음은 전력선 배전망의 결선보다는 부하 저항에 의해 많이 발생하며 위의 잡음이 중첩된 형태로 나타난다. 그림 2. 는 전력선에서 측정된 전도성 잡음을 나타낸 그림이다. 고압 전력선은 주로 야외에 노출되어 있기 때문에 주위의 전자파들의 영향으로 5 MHz~20 MHz 사이에서 협대역 잡음이 많이 발생하는 것을 알 수 있으며, 주파수가 증가할수록 잡음의 크기가 서서히 줄어들어 20 MHz 이상에서는 거의 일정한 수준을 유지하는 것을 알 수 있다. 신호 대 잡음 비는 신호전력과 잡음전력의 비로 나타내며, 전력선통신을 위한 최소한의 신호대 잡음비로 10 dB를 제시하고 있다. [1]

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{S_p}{N_p} \right) \quad (9)$$

측정된 고압 전력선에서 전도성잡음은 -69 dBm의 평균값을 나타내며, 최악의 경우 -50 dBm 정도를 나타낸다. 따라서 고압 전력선을 이용하여 통신이 가능하려면, 최소한 -59 dBm 이상의 신호전력이 입력되어야 하며, 그 이상의 전력의 입사신호를 입력하게 되면 양호한 SNR을 확보할 수 있으나, 전력선으로부터 방사되는 전자파의 양이 증가하게 되므로 입사신호의 전력과 방사되는 전계의 크기 사이에 교환관계 (trade off)가 형성된다. 따라서 입사되는 전력을 -50, -40, -30 dBm으로 변화시켜 가며 방사파의 전계의 크기를 살펴보았다. 이 때 방사되는 전계의 크기는 FCC의 방사규정을 만족하여야 한다. DMT 신호를 인가하였을 경우, 전력선에 흐르는 전류( $I_t$ )는 전력선에 존재하는 전도성 잡음에 의한 전류( $I_n$ )와 DMT 신호에 의해 발생하는 전류( $I_s$ )의 합으로 나타낼 수 있다.

$$I_t = I_n + I_s \quad (10)$$

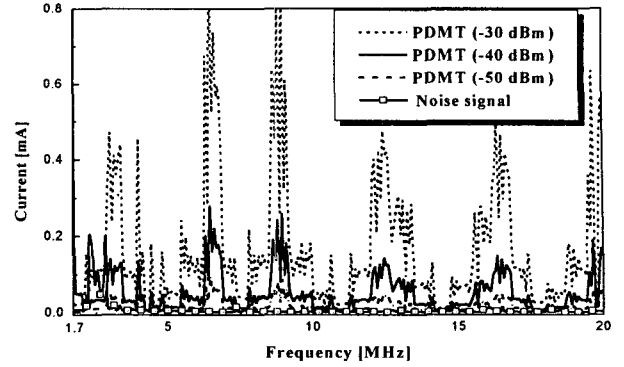


그림 3. 입력신호 전력의 변화에 따른 전류.  
Fig. 3. Current to the variation of input signal power level.

이제 본 연구에서 사용한 모델이 전력선통신을 위해 할당된 주파수대역내에서 높은 잡음과 신호의 감쇠를 고려하여 1.7~20 MHz 대역을 사용하였으므로 신호에 의한 전류는 20 MHz 까지만 존재하게 된다. 그림 3. 은 DMT 신호의 전력크기에 따른 전류 및 전도성잡음에 의한 전류를 나타낸 것이다. 전력선의 길이가 무한하다고 가정하고, 두 도선 사이의 거리는 80 cm 라고 할 때, 구해진 전류를 이용하여 전력선으로부터  $\rho$  만큼 떨어진 지점의 전기장은 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{E} = -\vec{a}_z \frac{\beta^2 I}{4\omega\epsilon} [H_0^{(2)}(\beta\rho_i) - H_0^{(2)}(\beta\rho_r)] \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \rho_i &= \sqrt{\rho^2 \cos^2(\phi) + (\rho \sin(\phi) - h)^2} \\ \rho_r &= \sqrt{\rho^2 \cos^2(\phi) + (\rho \sin(\phi) + h)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (11) 에서  $H_0^{(2)}$  는 3종 베셀 함수를 나타내고,  $\rho_i, \rho_r$  은  $\rho$  및 선로사이의 거리  $2h$ 로부터 식 (12)와 같이 계산할 수 있다. 모델로부터 통신신호가 발생하지 않을 경우, 전력선의 전도성잡음은 ambient 상태의 방사전자파를 형성한다. 따라서 PLC 모델로부터 통신신호가 전력선으로 입력될 경우, 전도성 잡음과 신호성분에 의한 전류에

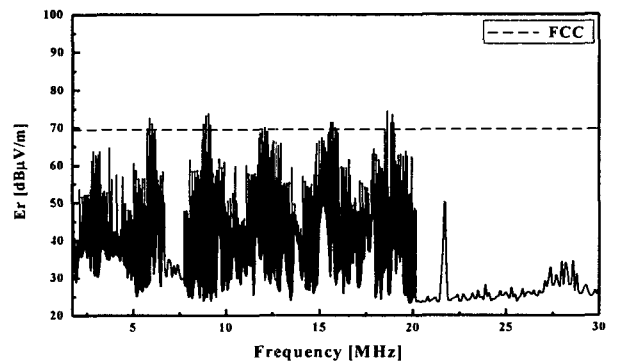


그림 4. -40 dBm DMT 신호에 의한 방사전계  
Fig 4. Emissive electric field by -40 dBm DMT signal.

의해 방사파가 생성되게 된다. 앞에서 구한 전류를 이용하여 DMT 신호의 전력이 -40 dBm 일 경우의 방사 전계를 구하면 그림 4. 와 같이 나타낼 수 있으며 FCC 의 제한치인 69.5 dB $\mu$ V/m 를 대체적으로 만족하는 것을 알 수 있다.

### 5. 방사 전자파 측정 및 분석

계산한 결과의 타당성을 알아보기 위해 실제 고압 전력선으로부터 방사되는 전계의 크기를 측정해 보았다. 전자파의 측정에 필요한 주요 계측기로는 EMC 분석기(E7402), active lcop안테나(6502 D=60 cm), PLC 모뎀(f=1.7~20MHz, Zeline社)을 사용하였다. 측정법은 3 m 법으로 하였으며, 주파수의 범위는 1.7~30 MHz 로 하였다. 그림 5.는 전력선의 전도성 잡음에 의해 발생하는 방사 전계의 계산치를 나타낸 것이다. 그러나 실제 Ambient 상태에서의 측정치인 그림 6. 에서 살펴보면, 전력선의 전도성잡음뿐 아니라 아마추어 무선 통신 또는 기타 방송 등 여러 가지 잡음 신호가 포함되어 있다. 본 논문에서는 전력선의 전도성잡음과 DMT 통신신호만을 고려하였기 때문에 계산 치와 측정치를 정확한 비교를 위해서는 측정치에서 환경에 의한 전자파를 제외해야 한다.

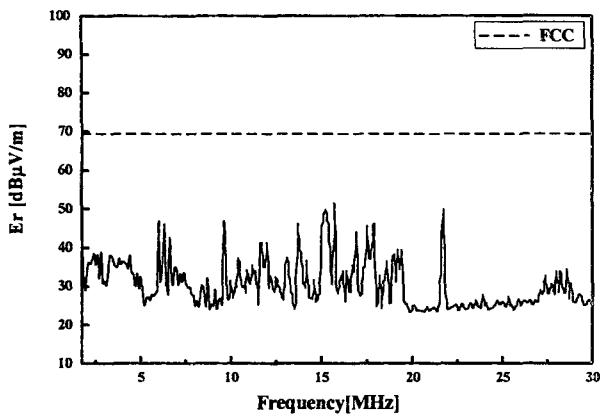


그림 5. 전도성잡음에 의한 방사전기장  
Fig. 5. The emissive electric field by conductive noise.

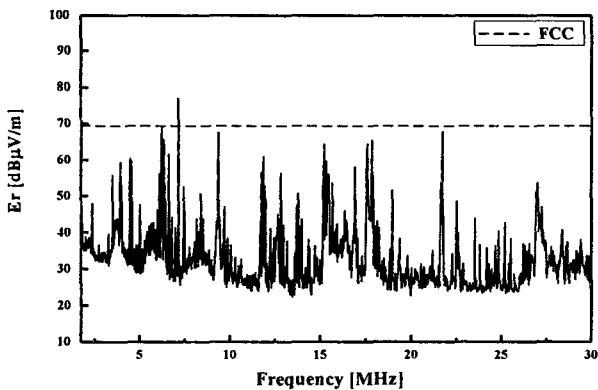


그림 6. Ambient 상태의 방사 전계 측정치  
Fig. 6. Measurement of emissive electric field in ambient condition.

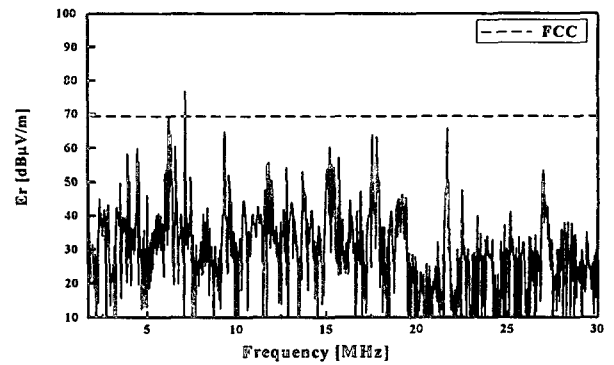
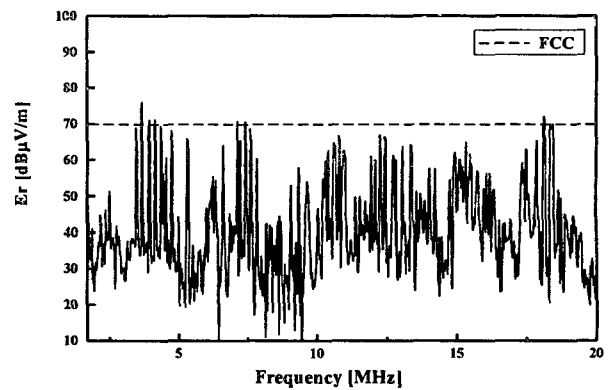
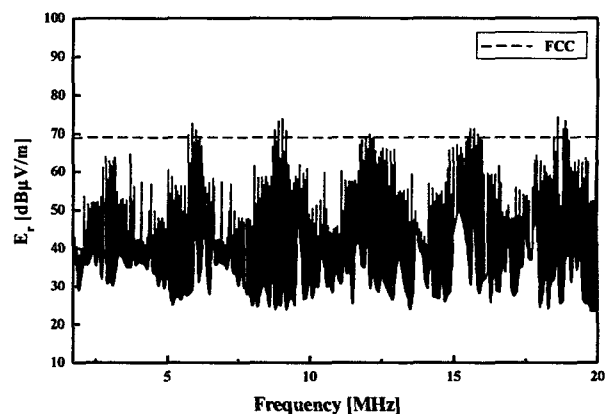


그림 7. 불요 방사전계  
Fig. 7. Unwanted emissive electric field.

그림 7. 은 측정 위치의 전력선으로부터 영향을 받지 않을 만큼 충분히 떨어진 지점에 안테나를 위치시켜 공간상에 존재하는 불요방사전계를 측정한 것으로서 그림 6. 에서 불요방사전계를 제거한 것이 순수한 전력선에 의한 방사전계를 나타내는 것이 된다.



(a)



(b)

그림 8. -40 dBm DMT 신호시 방사전계의 비교  
(a) 측정 결과, (b) 계산 결과  
Fig. 8. Emissive electric field in the case of -40 dBm DMT signal.  
(a) Measurement result. (b) Calculation result.

그림 8. 은 앞에서 -40 dBm 의 전력을 가지는 입력신호가 인가될 경우, 방사되는 전계를 모의실험을 계산한 것과 실제 측정치와 비교해 본 것이다. 그림 8. (a)는 -40 dBm 의 전력을 가지는 DMT 통신신호를 PLC 모델을 통해 전력선에 입력시켰을 때, 전력선으로부터 3 m 떨어진 지점에서 계산된 전계측정 결과에서 환경의 영향으로 발생하는 불요방사전계를 제거한 것이며 (b)는 모의실험을 통해 계산된 결과를 나타낸 것이다. 그림 8. 에서 알 수 있듯이 방사되는 전자파의 측정치에서 환경의 영향을 제외한다면, 최대치가 약 76dB $\mu$ V 로써 계산결과와 비교하여 약 2 dB의 작은 오차를 보이며, 패턴도 유사함을 알 수 있으며, 앞에서 말한 바와 같이 FCC의 전자파 장애 규정인 69.5 dB $\mu$ V/m를 대체적으로 만족하는 것을 알 수 있다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 고압 전력선 모델 및 신호입력 네트워크를 이용해 신호 입력단의 임피던스를 계산하였으며, 계산된 임피던스를 이용해 DMT 방식을 이용한 입력신호 및 전도성잡음에 의한 방사전계를 계산하였다. 방사 전계를 실제로 측정된 결과 외부 환경적 요인에 의한 전계성분을 제외하면 최대치가 약 76 dB $\mu$ V 로써 계산결과와 비교하여 약 2dB의 작은 오차를 보이며, 패턴도 유사함을 알 수 있었다. 이런 결과들로부터 계산에 의한 방사 전계의 예측이 가능하기 때문에 향후 전력선통신의 전자파 장애 규정에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

[1] D.Grimaldi, S. Rapuano, G. Truglia, "An Automatic Digital Modulation Classifier for Measurement on Telecommunication Networks", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 957-962, May 2002.  
 [2] T. Esmailian, P. G. Gulak, F. R. Kschischang, "A discrete multitone power line communications system",

Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2000. ICASSP'00. Proceedings. 2000 IEEE International Conference on , Vol 5, pp 2953-2956, June 2000.  
 [3] Yi-Fu Chen, Tzi-Dar Chiueh, "A 100- Kbps Power-Line Modem for Household Applications", VLSI Technology, Systems, and Applications, 1999. International Symposium on, pp. 179-182, June 1999.  
 [4] Chow, P.S.; Cioffi, J.M.; Bingham, J.A.C. "A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels", Communications, IEEE Transactions on , Volume: 43Issue: 234, pp. 773-775 Feb./March/April 1995.  
 [5] 김선효, 김상태, 이영철, 신철재, "고속 전력선 통신을 위한 중전압 선로의 방사전자파 측정 및 분석", 한국전자과학회논문집, 제14권, pp. 54-62, Jan, 2003.  
 [6] Issa, F.; Chaffanjon, D.; Pacaud, A. "Outdoor Radiated Emission Associated with Power Line Communications Systems", Electromagnetic Compatibility, EMC. 2001 IEEE International Symposium on, Volume: 1, 13-17, pp 521-526, Aug. 2001.  
 [7] T. Esmailian, F. R. Kschischang, P. G. Gulak, "Characteristics of In-building Power Lines at High Frequencies and their Channel Capacity", ISPLC 2000, pp. 52-59.  
 [8] 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, International Conference on, Vol. 2, pp. 1290-1295, Oct. 2002.  
 [9] Constantine A.Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons, 1989.  
 [10] J. B. O'Neal, JR., "Substation Noise at Distribution Line Communication Frequencies", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol. 30, No 1, Feb 1988.

저 자 소 개



**이 진택(李眞澤)**

1975년 1월 20일생. 1997년 아주대 전자공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자공학과 졸업(공석). 2002년~ 현재 동 대학원 전자공학과 박사과정

Tel : 031-219-2374, Fax : 031-212-9531

E-mail : ljt1234@ajou.ac.kr



**천 동완(千東完)**

1976년 10월 23일생. 1999년 아주대 전자공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전자공학과 졸업(공석). 2001년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정

Tel : 031-219-2374, Fax : 031-212-9531

E-mail : chun@ajou.ac.kr



**박 영진(朴永鎭)**

1971년 1월 7일생. 1997년 중앙대 전자공학과 졸업. 2002년 University of Karlsruhe 졸업(공박). 2002년~현재 한국 전기연구원 전기 정보망그룹 선임연구원

Tel : 031-420-6183, Fax : 031-420-6199

E-mail : yjpark@keri.re.kr



**이 원태(李垸泰)**

1955년 2월 15일생. 1983년 연세대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(공석). 1985년~현재 한국 전기연구원 전기 정보망그룹 책임연구원

Tel : 031-420-6183, Fax : 031-420-6199

E-mail : wtlee@keri.re.kr



**신철재(愼철재)**

1941년 6월 4일생. 1964년 연세대 전기공학과. 졸업 1983년 동 대학원 졸업(공박). 1997년~현재 아주대 전자공학과 교수

Tel : 031-219-2358, Fax : 031-212-9531

E-mail : shincc@ajou.ac.kr