

# 네트워크 부하 조건의 변화가 채널 상태 정보에 미치는 영향을 고려한 옥내 전력선 통신 채널의 채널 용량 분석

논 문
60-2-4

## Channel Capacity Analysis for Indoor PLC Networks with Considering the Effect of Loading conditions of Networks on Channel State Information

신재영\* · 정지채†  
(Jae-Young Shin · Ji-Chai Jeong)

**Abstract** - We analyze the channel capacity with considering the effect of the loading conditions of indoor PLC networks on channel state information. We consider various numbers of load for two kinds of the networks with regular length branches and a deployed network of indoor PLC. For calculating the channel capacity degradation, two noise scenarios and impedances are considered. From the simulation results, we suggest the robust regression lines for modeling the channel capacity degradation. In the cases of  $0 \Omega$  and  $Z_0$  loads, natural log and linear function curve show the best goodness of fit, respectively. For the deployed indoor PLC network with  $0 \Omega$  loads, compared with the networks with regular length branches, the goodness of fit decreases by the amount of 0.12 and 0.15 for low noise and high noise scenarios, respectively. Using the regression lines, we can estimate the channel capacity degradation without measurement.

**Key Words** : Channel capacity, Channel state information, PLC, Power-line communications

### 1. 서 론

전력선 통신(Power-line Communications, PLC)이란 전력 전송을 위한 케이블을 이용하여 데이터를 전송하는 기술이다. 이 기술은 스마트 그리드(smart grid) 프로젝트의 핵심 기술이며 이를 이용하여 원격 검침(Automatic Meter Reading, AMR) 등의 신기술이 현재 상용화를 앞두고 있다. 또한 가정에 존재하는 전기 콘센트에 통신 기기를 꽂기만 하면 통신 네트워크를 만들 수 있기 때문에 최근 홈-네트워크 구성을 위한 기술로 가장 유력한 대안으로 떠오르고 있는 실정이다 [1-2]. 전력선 통신으로의 접근성은 매우 우수하다. 주거, 상업, 공업 지역을 가리지 않고 전기 시설이 존재하는 곳이라면 어디든지 전력선 통신 기술을 이용할 수 있기 때문이다. 또한 새로운 통신 네트워크를 구축할 필요가 없이 이미 존재하는 네트워크를 이용하여 통신 시스템을 완성하기 때문에 통신 설비 구축에 전혀 추가적인 비용이 들어가지 않는다. 이러한 전력선 통신 시스템은 기존의 다른 시스템보다 월등한 장점을 가지고 있다. 하지만 전력선 통신에 사용하는 전력 전송용 케이블은 전력 전송에 최적화되어 있기 때문에 데이터 전송에는 여러 가지 문제점이 있다. 하지만 이러한 문제점을 극복하기 위한 연구들이 많이 진행되어 현재 많은 부분이 극복되어 있다 [3]. 현재까지 전력선 통신 시스템의 채널 용량 변화에 대한 몇 가지 연구가

진행되었다 [4-5]. 하지만 이전의 연구들은 전력선 통신의 두 가지 배경 잡음을 고려하지 않았고, 다양하게 변화할 수 있는 네트워크 터미널의 부하 조건을 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 이러한 조건들을 고려하여 옥내 전력선 통신 채널의 채널 용량의 변화를 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 옥내 전력선 통신 채널 특성과 잡음 특성을 소개하고, 3장에서는 채널 용량의 변화를 다양한 조건을 고려하여 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 4장에서는 본 논문의 결론을 나타내었다.

### 2. 옥내 전력선 통신 채널의 특성

#### 2.1 시변 채널 특성

전력선 통신 네트워크는 전력 전송망을 직접 사용하기 때문에 옥내 전력선 통신 채널에는 다양한 종류의 가전제품들이 연결되어 있다. 이러한 가전제품은 임피던스 정합을 고려하지 않았기 때문에 전력 케이블의 특성 임피던스(characteristic impedance)와 가전제품의 임피던스 간의 임피던스 부정합(impedance mismatch)에 의한 다중 경로 신호 전송(multi-path signal propagation) 현상을 유발한다. 이는 결과적으로 전력선 채널 특성이 저하되는 특징을 나타낸다. 또한 사람들의 일상생활 패턴에 따라서 네트워크에 연결되는 가전제품의 수와 종류가 변화하기 때문에 채널 특성이 일정하지 않고 시간적으로 다양하게 변화(time-variant)한다. 따라서 시간에 따라서 특정한 채널의 특성과 품질을 보장할 수 없다. 그림 1은 실제 옥내 전력선 통신 네트워크와 그것을 간단하게 나타낸 도식도이다. 이를 이용하여 전력선 통신의 시변 특성을 살펴보면 그림 2와 같

\* 정 회 원 : 고려대 정보통신대 컴퓨터 · 전파통신공학과 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 고려대 정보통신대 뇌공학과 정교수 · 공박 E-mail : jcyj@korea.ac.kr

접수일자 : 2010년 11월 2일

최종완료 : 2011년 1월 19일

다 [6]. [6]에 언급된 시변 부하 시나리오에 따라서 하루 중 시간에 따라서 채널 응답이 매우 다양하게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

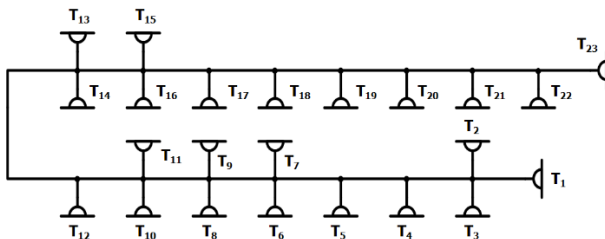
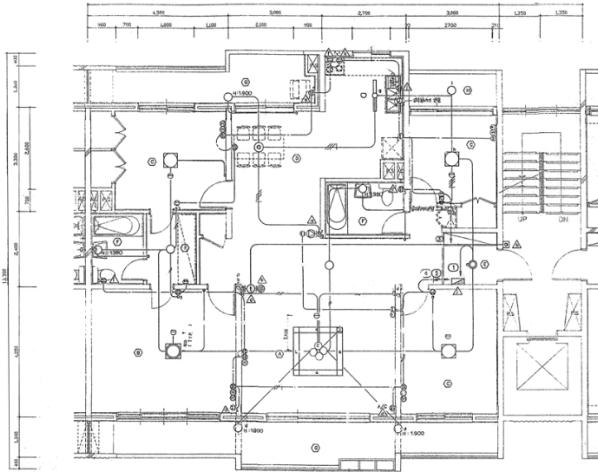


그림 1 옥내 전력선 통신망과 간단하게 나타낸 도식도  
Fig. 1 Diagram of indoor PLC network

**2.2 잡음 특성**

일반적인 유·무선 통신 채널과 다르게 전력선 통신 채널에 존재하는 잡음(noise)은 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise) 특성을 보이지 않는다. 전력선 통신 채널에 존재하는 잡음은 크게 컬러 배경 잡음(colored background noise), 협대역 잡음(narrowband noise), 그리고 임펄스 잡음(impulsive noise)의 3가지로 분류할 수 있다 [7]. 컬러 배경 잡음은 주로 네트워크에 연결되어 있는 가전제품에 의하여 발생하는 잡음으로 전력선 채널에는 일정하게 존재하는 잡음이다. 협대역 잡음은 아마추어 무전(HAM), TV, 그리고 radio의 주파수 대역이 전력선 통신에서 사용되는 주파수 대역과 겹쳐 발생하는 잡음이다. 임펄스 잡음은 가전제품의 on/off 스위칭 동작에 의하여 발생하는 것으로 그 잡음 전력의 크기가 다른 종류에 비해서 매우 크다. 하지만 그 지속 시간이 매우 짧기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않는다. 컬러 배경 잡음은 가전제품이 잡음원(noise source)이기 때문에 네트워크에 연결된 가전제품의 종류에 따라서 잡음 전력의 크기가 달라진다. 본 연구에서는 [8]을 따라 컬러 배경 잡음을 고 잡음과 저 잡음으로 분류하고, 그에 따른 잡음 전력의 크기의 변화를 그림 3에 나타내었다. 그림 3과 같이 컬러 배경 잡음은 주파수가 높아질수록 잡음 전력이 낮아지는 주파수 선택적 경향성을 보인다.

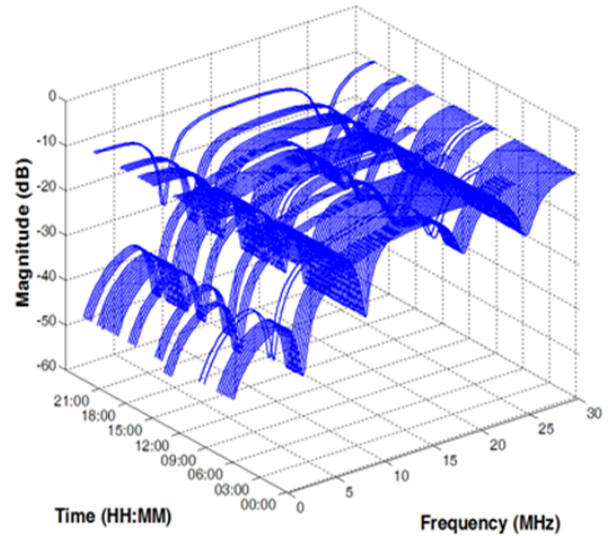


그림 2 옥내 전력선 통신 채널 응답의 시변 특성  
Fig. 2 Time-varying characteristic of channel response of indoor PLC channel

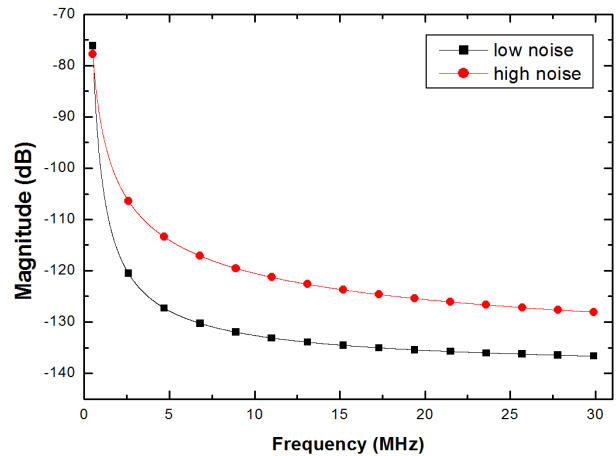


그림 3 전력선 채널의 컬러 배경 잡음의 잡음 전력 특성  
Fig. 3 Characteristic of colored background noise in PLC channel

**3. 채널 용량 변화 시뮬레이션**

**3.1 다중 경로 전송을 고려한 옥내 전력선 통신 채널의 채널 응답**

전력선 통신 채널에는 다양한 종류의 가전제품이 부하의 역할을 하며, 이는 임피던스 부정합을 발생 시킨다. 임피던스 부정합은 다중 경로 신호 전송 현상의 원인이고 이로 인하여 채널 조건이 악화된다. 따라서 다중 경로 신호 전송을 고려한 채널 응답을 알아야 채널 용량 변화를 확인할 수 있다. 전력선 통신 채널의 다중 경로 신호 전송을 고려한 채널 응답 모델은 다음과 같다 [9].

$$\begin{cases} H(f) = D(A_1 + 1)(A_2 + 1) \\ A_1 = LOS_{ad_{L1}} + OBS_{ad_{L1}} \left( \prod_{k=1}^{K_{L_1}} (S_{ad_{L1k}} + 1) - 1 \right) \\ A_2 = LOS_{ad_{R1}} + OBS_{ad_{R1}} \left( \prod_{k=1}^{K_{R_1}} (S_{ad_{R1k}} + 1) - 1 \right) \end{cases} \quad (1)$$

3.2. 시뮬레이션 조건

그림 4는 옥내 전력선 통신 채널의 채널 용량의 변화를 확인하기 위하여 시뮬레이션에 사용된 전력선 통신 네트워크이다.

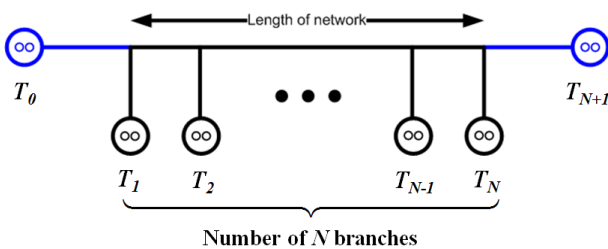


그림 4 시뮬레이션에 사용된 전력선 통신 네트워크. N=15, 20이 사용되었다

Fig. 4 An indoor PLC network used for simulation. N=15, and 20 is considered

네트워크에는 15개, 20개의 분기가 존재하며, 다양한 부하의 위치를 고려하여 네트워크의 터미널( $T_0, T_1, \dots, T_{N+1}$ )에 부하 임피던스를 결정하였다. 네트워크에는  $1 \sim (N-1)$  개의 부하가 연결될 수 있고, 부하의 위치는  $T_1 \sim T_N$  중에서 무작위로 선택된다. 시뮬레이션에서  $T_0$ 은 신호 전송 터미널이고  $T_{N+1}$ 은 채널 응답 측정 터미널이다. 부하 임피던스 값은 0 Ω과 전력선의 특성 임피던스 값( $Z_0$ ) 두 가지를 고려하였다. 부하가 연결되지 않은 터미널은 열린 상태(open circuit state)이므로 임피던스 값으로  $|Z| = 10^6 \Omega (\approx \infty)$ 을 사용하였다. 특성 임피던스 값( $|Z_0|$ )은 주파수에 따라 변하며, 대략 80~90 Ω이다. 분기의 개수와 관계없이  $T_0$  과  $T_{N+1}$  사이의 거리는 40 m로 일정하게 유지하였고, 각각의 분기( $T_1, T_2, \dots, T_N$ 이 연결된 선) 사이의 거리는 분기의 개수가 15개, 20개일 때 각각 2.86m, 2.11m이며 각각의 분기의 길이는 1 m로 일정하게 유지하였다. 계산의 복잡도를 줄이기 위하여 각 부하 개수 경우에 대하여 다양한 부하 조건 중에 50가지를 무작위 추출하여 채널 용량 변화량을 시뮬레이션을 통하여 계산하였다.

3.3 채널 용량 변화 분석

채널 용량을 계산하기 위하여 Shannon의 information theory를 이용하였다. FCC 규정에 의거하여 신호 전력은 -72~-52 dBm/Hz로 제한된다 [10]. 본 연구에서는 시뮬레이션 결과 신호 전력의 크기의 변화가 채널 용량의 변화에 영향을 주지 못할 정도로 무시할 수 있는 정도임을 확인하고 -60 dBm/Hz의 신호 전력만을 사용하였다. 그림 5는 15

개의 분기가 있는 네트워크에서 분기에 연결된 부하 개수를 변화시키면서 확인한 채널 용량 감소량 시뮬레이션 결과이다. 앞에서 언급했듯이 50가지의 터미널 부하 조건을 무작위로 선정하였다. 부하가 연결된 터미널의 임피던스는 0 Ω 또는  $Z_0$ 이다. 부하가 연결되지 않은 터미널의 임피던스는 106 Ω이다. 부하 임피던스가 0 Ω인 경우, 저 잡음 조건에서 채널 용량은 분기에 연결된 부하의 개수에 따라 32.17 ~ 242.81 Mbps 감소하였고, 고 잡음 조건에서 138.53 ~ 313.03 Mbps 감소하였다. 부하 임피던스가  $Z_0$ 일 경우, 저 잡음 조건에서 채널 용량은 분기에 연결된 부하의 개수에 따라 25.96 ~ 362.39 Mbps 감소하였고, 고 잡음 조건에서 132.34 ~ 463.05 Mbps 감소하였다.

그림 6은 20개의 분기가 있는 네트워크에서 분기에 연결된 부하 개수를 변화시키면서 확인한 채널 용량 감소량 시뮬레이션 결과이다. 부하 조건은 그림 5의 경우와 같이 무작위로 50가지를 추출하여 사용하였다. 부하 임피던스가 0 Ω인 경우, 저 잡음 조건에서 채널 용량은 분기에 연결된 부하의 개수에 따라 32.18 ~ 260.73 Mbps 감소하였고, 고 잡음 조건에서 138.51 ~ 322.60 Mbps 감소하였다. 부하 임피던스가  $Z_0$ 일 경우, 저 잡음 조건에서 채널 용량은 분기에 연결된 부하의 개수에 따라 25.96 ~ 481.29 Mbps 감소하였고, 고 잡음 조건에서 132.31 ~ 552.77 Mbps 감소하였다.

그림 7은 21개의 분기가 있는 실제 전력선 네트워크에서 분기에 연결된 부하 개수를 변화시키면서 확인한 채널 용량 감소량 시뮬레이션 결과이다. 부하 조건은 그림 5, 6의 경우와 같이 50개의 무작위 부하 조건 샘플을 추출하여 이용하였다. 부하 임피던스가 0 Ω인 경우, 저 잡음 조건에서 채널 용량은 분기에 연결된 부하의 개수에 따라 118.80 ~ 624.43 Mbps 감소하였고, 고 잡음 조건에서 223.88 ~ 624.43 Mbps 감소하였다. 부하 임피던스가  $Z_0$ 일 경우, 저 잡음 조건에서 채널 용량은 분기에 연결된 부하의 개수에 따라 21.55 ~ 493.47 Mbps 감소하였고, 고 잡음 조건에서 136.36 ~ 568.51 Mbps 감소하였다.

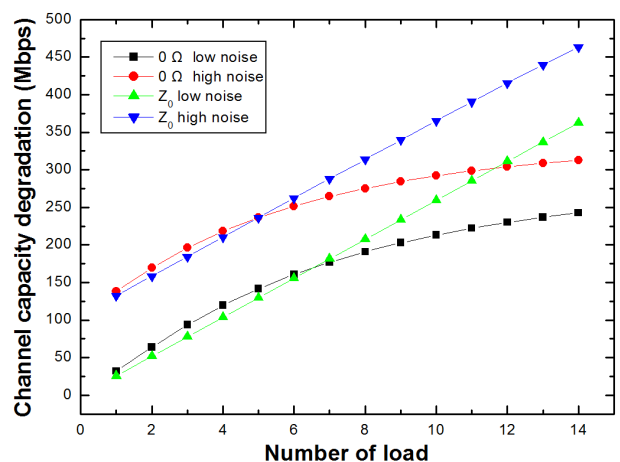


그림 5 15개의 분기를 가진 전력선 네트워크에서의 부하 개수 변화에 따른 채널 용량 감소 시뮬레이션 결과

Fig. 5 Simulation result of channel capacity degradation in 15-branch network as a function of the number of load

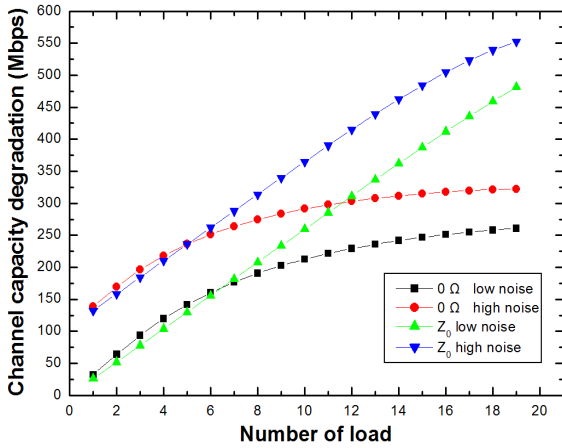


그림 6 20개의 분기를 가진 전력선 네트워크에서의 부하 개수 변화에 따른 채널 용량 감소 시뮬레이션 결과  
 Fig. 6 Simulation result of channel capacity degradation in 20-branch network as a function of the number of load

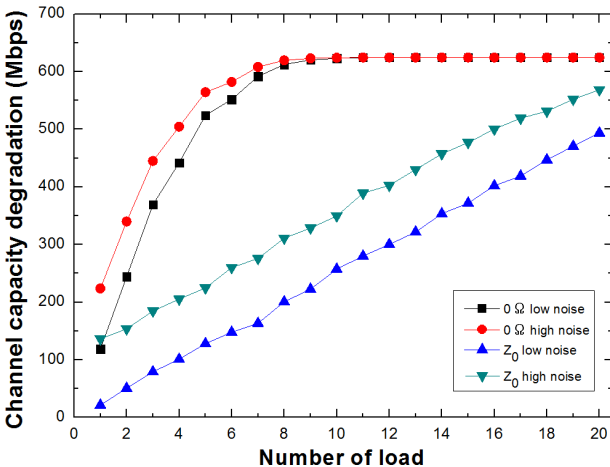


그림 7 21개의 분기를 가진 실제 전력선 네트워크에서의 부하 개수 변화에 따른 채널 용량 감소 시뮬레이션 결과  
 Fig. 7 Simulation result of channel capacity degradation in 21-branch network as a function of the number of load

3.4 회귀 분석

시뮬레이션 결과, 채널 용량 감소 속도가 저하되는 것에 일정한 경향성이 있다는 것을 확인하였다. 이러한 채널 용량 감소량을 예측할 수 있다면 전력선 통신 채널의 채널 용량의 변화를 미리 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 회귀 분석을 통하여 채널 용량 감소량을 잘 알려진 곡선 모형으로 나타내었다. 곡선 모델의 적합도(goodness of fit)은 다음과 같이 정의되는  $R^2$ 의 값을 통하여 확인하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{error}}{SS_{total}} \quad (2)$$

$SS_{error}$ 은 잔차제곱합,  $SS_{total}$ 은 전체제곱합이다.  $R^2$  값이 클수록 더 적합한 곡선 모형이고 0 ~ 1의 값을 가질 수 있다. [11]. 시뮬레이션에 이용된 15, 20개의 분기를 가진 네트워크와 21개의 분기를 가진 실제 네트워크에 대한 채널 용량 감소량 회귀 곡선을 통하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\text{채널 용량 감소량} = \alpha \ln(N) + \beta \quad (3)$$

(0 Ω 부하 임피던스일 경우)

$$\text{채널 용량 감소량} = \alpha N + \beta \quad (4)$$

( $Z_0$  부하 임피던스일 경우)

$N$ 은 부하의 개수이고 회귀 곡선의  $\alpha$ 와  $\beta$  값은 표 1, 2, 그리고 3에 나타내었다. 15개, 20개의 분기를 가진 네트워크의 경우, 0 Ω 부하 임피던스에 대해서는 자연로그 곡선을 이용한 회귀 모형의  $R^2$  값이 0.99 이상을 나타내어 시뮬레이션 결과와 거의 완벽하게 일치함을 확인할 수 있었다. 21개의 분기를 가진 실제 네트워크의 경우, 0 Ω의 부하에 대해서 자연로그 곡선을 이용한 회귀 모형 분석 결과  $R^2$  값이 저 잡음 상태에서 0.85, 고 잡음 상태에서 0.88을 보여 15개, 20개의 분기를 가진 네트워크에 비하여 회귀 모형의 적합도가 0.15, 0.12 정도 감소하는 것을 확인하였다. 이는 실제 네트워크의 경우 네트워크에 존재하는 분기 접점 사이의 거리가 일정하지 않고, 또한 분기의 길이도 일정하지 않아서 다중 경로 신호 전송 현상이 더욱 심해져서 발생하는 신호 전달 경로의 무작위성이 더욱 증가하여 생기는 현상이다.

$Z_0$  부하 임피던스에 대해서 직선 모형을 이용한 회귀 모형이 모든 경우에 시뮬레이션 결과와 완벽하게 일치함을 확인하였다. 또한 고 잡음 조건일 경우, 채널 용량 감소량이 저 잡음 조건일 경우보다 크게 나타난다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 옥내 전력선 통신 네트워크에 대하여 부하의 개수를 변화시키면서 두 가지 잡음 조건, 부하 임피던스 값을 고려하여 채널 용량 감소량을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 채널에 연결된 부하의 개수가 증가할수록 채널 용량이 더 많이 감소하였다. 회귀 분석 결과 0 Ω 부하일 경우 곡선 모형,  $Z_0$  부하일 경우 직선 모형이 적합하다는 것을 확인하였다. 따라서 이러한 결과를 바탕으로 옥내 전력선 통신 채널의 채널 용량 감소를 측정하지 않고 예측할 수 있다.

표 1 15개의 분기를 가진 네트워크의 부하 임피던스 개수의 변화에 따른 채널 용량 감소에 대한 곡선 모형의 계수

Table 1 Model parameter of channel capacity degradation of 15-branch network

부하 임피던스	잡음 강도	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
0 Ω	낮음	86.17	11.24	0.98
0 Ω	높음	70.79	126.30	0.99
$Z_0$	낮음	25.91	0.25	1.00
$Z_0$	높음	25.59	108.10	1.00

**표 2** 20개의 분기를 가진 네트워크의 부하 임피던스 개수의 변화에 따른 채널 용량 감소에 대한 곡선 모형의 계수

**Table 2** Model parameter of channel capacity degradation of 20-branch network

부하 임피던스	잡음 강도	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
0 Ω	낮음	85.74	11.71	0.99
0 Ω	높음	68.13	129.5	0.99
$Z_0$	낮음	25.53	2.577	1.00
$Z_0$	높음	24.08	117.2	1.00

**표 3** 21개의 분기를 가진 네트워크의 부하 임피던스 개수의 변화에 따른 채널 용량 감소에 대한 곡선 모형의 계수

**Table 3** Model parameter of channel capacity degradation of 20-branch network

부하 임피던스	잡음 강도	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
0 Ω	낮음	166.1	195.4	0.88
0 Ω	높음	125.1	304.00	0.85
$Z_0$	낮음	24.79	1.34	1.00
$Z_0$	높음	23.58	115.30	1.00

**감사의 글**

This research was supported in part by Brain Korea21 project in 2010, WCU (World Class University) program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Education, Science and Technology (R31-10008)

**참 고 문 헌**

[1] T. Banwell and S. Galli, "A novel approach to the modeling of the indoor power line channel-Part I: Circuit analysis and companion model," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 655-663, Apr. 2005.

[2] Despina Anastasiadou and Theodore Antonakopoulos, "Multipath Characterization of Indoor Power-Line Networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 1, pp. 90-99, Jan. 2005

[3] E. Biglieri, "Coding and modulation for a horrible channel," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 92-95, May 2003.

[4] J. Anatory, N. Theethayi, R. Thottappillil, M.M. Kissaka, N.H. Mvungi, "The effects of load impedance, line length, and branches in the BPLC-transmission-line analysis for indoor voltage channel," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 4,

pp. 2150-2155, Oct. 2007.

[5] J. Anatory, N. Theethayi, R. Thottappillil, M.M. Kissaka, N.V. Mvungi, "The effects of load impedance, line length, and branches in typical low-voltage channels of the BPLC systems of developing countries: Transmission-line analyses," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 2, pp. 621-629, Apr. 2009.

[6] 신재영, 정지채, "채널 길이와 전송 전력을 고려한 시변 환경 옥내 단일 사용자 전력선 통신의 outage 확률 분석," *전기학회논문지*, 제59권, 제2호, pp. 285-290, 2010년 2월.

[7] M. Zimmermann and K. Dostert, "An analysis of the broadband noise scenario in powerline networks," *Proc. Int. Symp. Power Line Commun.*, Lancaster, U.K., 1999.

[8] T. Esmalian, P. Gulak, F. R. Kschischang, "A discrete multitone power line communications system," *ICASSP*, Istanbul, 2000, pp. 2953-2956.

[9] 신재영, 정지채, "무한 등비급수와 행렬을 이용하여 멀티 패스 신호 전송과 네트워크 크기에 의한 계산의 복잡성을 줄이고 근접 노드의 영향을 고려한 전력선 통신 채널 모델," *전기학회논문지*, 제58권, 제2호, pp. 248-255, 2009년 2월.

[10] W. Y. Chen, "Home Networking Basis: Transmission Environments and Wired/Wireless Protocols," Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, pp. 103-143, 2004.

[11] Steel, R. G. D. and Torrie, J. H., "Principles and Procedures of Statistics," New York: McGraw-Hill, 1960.

**저 자 소 개**



**신재영 (申宰榮)**

1983년 3월 4일생. 2007년 고려대학교 전파통신공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 컴퓨터·전파통신학과 석사과정  
Tel : 010-3936-8334  
E-mail : naraeshigo@korea.ac.kr



**정지채 (鄭智采)**

1953년 3월 14일생. 1980년 고려대 전자공학과 졸업. 1988년 CMU졸업(공박). 1993년~1995년 포항공과대학교 조교수. 1995년~현재 고려대학교 교수  
E-mail : jcj@korea.ac.kr