

論文2000-37TC-4-3

전력선망 구조별 통신 용량 해석

(Analysis of Channel Capacity according to Power Line Network-Topology)

朴 鍾 演 * , 曹 桂 鉉 *

(Chong Yeun Park and Gye Hyun Cho)

요 약

통신을 위한 채널로써 전력선을 활용하기 위해서, 전력선상에서 존재하는 잡음을 측정하여 잡음 데이터를 획득하고, 망구조에 따른 단위길이(100m당)에 따른 신호 감쇄량을 측정했다. 본 논문에서 구분한 3종류의 전력선 구조에 따른 신호 감쇄와 잡음의 최대, 최소값을 이용해서 채널 용량식에 대입한 후 통신 채널로써 전력선이 가지는 채널용량을 계산하였다. 건물내 전력선이 가지는 채널용량은 전력선에 있어서 송,수신기 사이의 거리와 전력선 망구조에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

Abstract

To use the power line as the communication channel, we have analyzed channel characteristics with the noise data and signal attenuation levels measured on power lines per 100m. In this paper, channel capacities are calculated in the best or the worst case noise states and signal attenuations on power lines for three kinds of network-topologies. Analyzed the channel capacity by the best and worst conditions, we concluded that the serious factors influenceing on the channel capacity are the length from a transmitter to a receiver and the network topology.

I. 머리말

최근 가정자동화와 사무 자동화의 발달에 따라 실내에서의 통신빈도가 급증함에 따라 전력선을 통신 채널로 이용하기 위한 관심이 높아지고 있다. 전력선을 이용하여 통신을 하면, 통신 채널로써의 전력선이 건물에 이미 설치되어있고, 많은 콘센트를 통해서 간단하게 시스템으로 접근할 수 있다. 따라서 건물의 손상없이 시스템의 설치가 가능하고 내부 통신선로를 확보할 수 있으며 건물 시공시 전설공사가 간편하다는 장점이 있다.

그러나 전력선은 전력의 공급을 주 목적으로 하기 때문에 여러 가지 제약이 있고, 전력선과 전력선이 이루는 망구조가 가지는 독특한 특성으로 인하여 통신에 제약이 발생한다.

전력선에 관련된 연구는 크게 전력선상에서 존재하는 잡음에 대한 연구^{[1][2]}와 전력선상에서의 신호의 감쇄에 대한 연구로 진행 되어왔다.^[3] 전력선에 존재하는 잡음은 유도성 낙뢰를 제외하고는 주로 전력선에 연결 되어있는 전기 기기가 발생한 단자전압에 의한 것으로, 백색잡음(White Noise), 60Hz고조파잡음(Harmonic Noise) 및 임펄스성 잡음(Impulsive Noise)등으로 크게 나눌 수 있다. 전력선에서 나타나는 신호 감쇄 특성은 망 구조형태에 따라서 감쇄특성이 다르며 전력선의 길이가 증가할수록 감쇄가 크게 일어나는 것으로 발표되었다.

본 논문은 이러한 특성을 가진 전력선을 통신채널로

* 正會員, 江原大學校 電氣電子工學部

(Division of Electrical and Electronics Engineering
Kangwon National university)

接受日字:1999年8月7日, 수정완료일:2000年4月4日

써 사용하기 위해서 건물내 전력선 구조에 따른 통신 용량을 계산한다.

2장에서는 건물내 전력선 망의 구조 및 모델링 방법 그리고 통신용량의 계산을 다루었고, 3장에서 결론을 맺는다.

II. 전력선에서의 통신 용량 계산

1. 전력선망의 구조(radial network)

건물 내에서 이루어지는 전력선의 구조는 대부분의 경우 radial network 구조를 이루고 있으므로 radial network 구조를 가지는 경우에 가질 수 있는 망의 형태를 구분하여 해석한다.^[3]

전력선망은 분전반 내에서 단일선로(A-B) 및 분기선로 사이(A-C), 분전반을 거친 후의 분기선로사이(A-D)로 구분하고 각각의 경우에 따라 신호의 감쇄와 잡음을 측정후 이를 기초로 하여 radial network 형태를 갖는 전력선망에서의 채널용량을 계산한다.

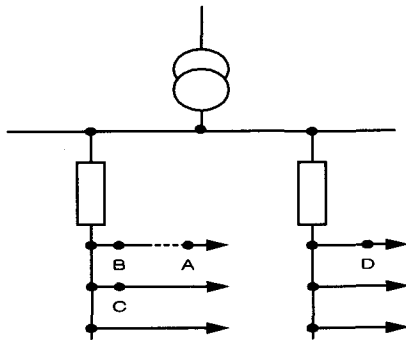


그림 1. 전력선망의 구조 (radial network)
Fig. 1. The structure of radial network.

2. 전력선의 모델링

초기의 전력선 모델링에 관한 연구는 1989년 Onuga 와 Donaldson이 발표한 논문^[2]으로 이 논문에서는 기본적으로 전력선에 대한 모델은 시불변 선형 필터이며, 60Hz에 동기된 신호와 noise fading이 영향을 끼치는 것으로 발표되었다.

논문^[1]에서는 보다 실제적인 전력선 채널에 대한 모델이 다루어졌고 기본적으로 시변 선형필터 모델로 정의되었다. 이 모델에서는 잡음은 수 많은 발생원으로부터 발생되며 측정된 결과에서 잡음과 신호의 감쇄사이

에 어떠한 상호관계도 나타나지 않기 때문에 여기서는 백색 잡음(AWGN)을 갖는 선형이며 시변인 필터 채널을 기본으로 하였다. 본 논문은 논문 [1]의 모델링을 기초로 했고 모델이 가지는 기본구조는 그림 2와 같다.

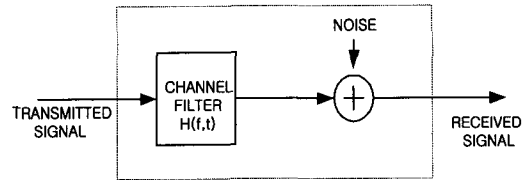


그림 2. 전력선 채널 모델 구조
Fig. 2. The power line model.

전력선 모델이 갖는 두가지 중요한 요소는 선형, 시변필터와 부가잡음으로 볼 수 있다.

첫째로, 선형, 시변필터는 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$H(f, t) = e^{a(f, t) - j\phi(f, t)} \quad (1)$$

식(1)에 대한 일반적인 필터, 전달함수의 표현은 $H(f,t)$ 이다. 그런데 전달함수는 신호의 감쇄를 나타내는 실수부분 $e^{a(f, t)}$ 과 신호의 위상을 나타내는 $e^{-j\phi(f, t)}$ 으로 구분해서 표현할 수 있다.

1) 신호 감쇄 특성

신호 감쇄 특성에 대한 측정을 하기 위해서 그림3과 같은 회로를 구성했다.

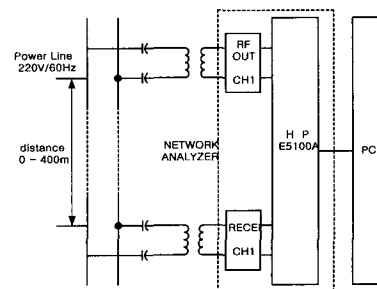


그림 3. 신호의 감쇄 특성 측정 회로
Fig. 3. The test circuit of signal attenuation.

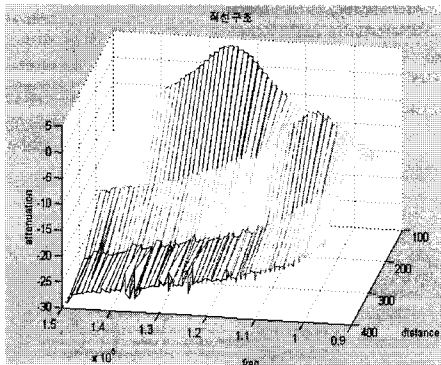
신호 감쇄 부분은 주어지는 장소에 따라, 전력선상에서 신호를 송신했을 때 신호가 감쇄되는 정도를 나타내고 이것은 대략적으로 주파수와 시간에 따른 감쇄

특성보다는 거리에 비례해서 증가되는 것으로 나타났다. 본 학과 건물 단상 2선식 110V 전력선의 길이 및 구조에 따라 측정주파수 대역 (95kHz~148.5kHz)에 대해서 평균적인 신호 감쇄를 단위길이 100m에 대해서 표현하면 그림4와 같다.

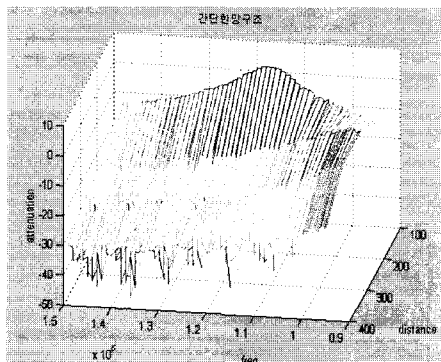
그림 4와 같이 얻은 측정 데이터를 가지고 단위 길이(100m)당 주파수 대역(95kHz~148.5kHz)사이에서의 평균 감쇄율을 구하고 얻은 결과를 적용한 Curve fitting을 수행한다. Curve fitting을 한 결과가 해석한 망구조에서 나타나는 망 구조에 따른 신호의 전달 함수 곡선이 된다. Curve fitting을 하기 위해서 사용한 프로그램은 Curve expert 1.2를 사용하였고 결과는 다음5와 같다.

전력선의 채널구조를 선형 시변 필터특성이라고 정의한 부분은 위와 같은 과정을 거치면서 시간변화에 따른 특성이 거리에 따른 선형 필터 형태로 변화한다. 전력선 망 구조에 따라서 단위길이(100m)당 신호의 감쇄 정도가 달라짐을 알 수 있다. 망구조 A-B, A-C에서의 신호의 감쇄형태는 단위길이가 늘어나면, 감쇄가 크게 일어나는 지수적 감쇄 형태를 갖는다. 그러므로 망 구조 A-B, A-C에 따른 평균 감쇄 특성은, 망 구조에 따른 변화를 크게 받지 않는다.

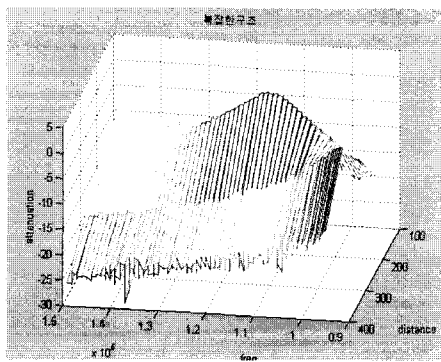
망 구조 A-D에서의 감쇄 형태는 망구조 A-B, A-C와는 다른 특성을 보이며 길이에 따른 3차 다항식 형태를 갖는 감쇄 특성을 갖는다.



㉑ A-B간 거리와 주파수에 따른 신호 감쇄

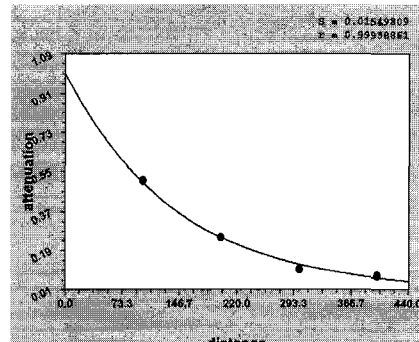


㉒ A-C간 거리와 주파수에 따른 신호 감쇄

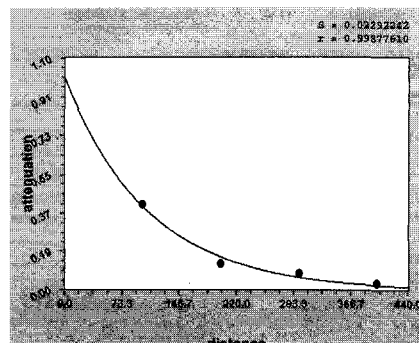


㉓ A-D간 거리와 주파수에 따른 신호 감쇄

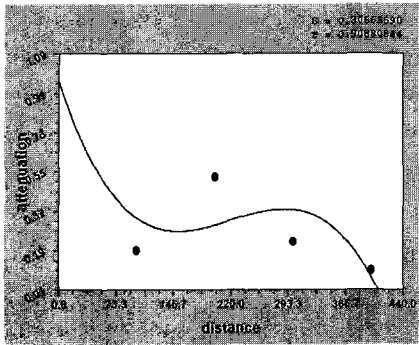
그림 4. 거리, 주파수에 따른 감쇄특성
Fig. 4. The attenuation characteristics according to distance and frequency.



㉑ 구조A-B 사이에 대한 신호 감쇄 특성



㉒ 구조 A-C사이에 대한 신호 감쇄 특성



㉔ 구조 A-D사이 에 대한 신호 감쇄 특성

그림 5. 망 구조에 따른 신호 감쇄 특성
Fig. 5. The attenuation characteristics according to Network topologies.

전력선에서 나타나는 전력선망 구조에 따른 신호의 감쇄 특성은 신호의 감쇄 정도를 나타내는 상수와 송신기와 수신기간의 거리 d의 관계를 가지며 채널구조에 따라서 다른 형태의 감쇄특성을 갖는다. 그래서 수식(1)에서 정의한 선형시변특성을 가지는 채널모델의 감쇄부분은 $e^{-\alpha(d)}$ 와 다항식형태를 가지는 거리에 따른 선형필터로 다시 쓸 수 있다. 획득한 자료를 가지고 얻은 전달함수는 각각 수식 (2),(3),(4)와 같다.

$$H(f, t, d)_1 = e^{-0.00543d} * e^{-j\theta(f, t)} \quad (2)$$

$$H(f, t, d)_2 = e^{-0.00731d} * e^{-j\theta(f, t)} \quad (3)$$

$$H(f, t, d)_3 = A + Bd + Cd^2 + Dd^3 \quad (4)$$

(A=0.955,b=-0.009,c=5.073e-05,d=-8.124e-08)

2) 위상 특성

전력선 상에서 나타나는 신호의 위상값은 시간, 주파수, 장소에 관계없이 평균적으로 매우 작은 변화값을 갖는 것으로 측정되었다. 그러나 거리가 증가하고 전기기기의 수가 증가하면 이에 따라 위상의 변화가 부분적으로 급격하게 변화되는 것으로 나타난다.

3) 전력선 임피던스

전력선에서 나타나는 임피던스특성은 전력선 자체가 가진 임피던스뿐만 아니라 전력선에 연결된 부하의 수가 증가하면 증가할수록 임피던스의 크기가 줄어들고 그 최대 범위는 0.5mΩ~10.Ω정도를 갖는다고 발표되었다.^{[1][4]}

본 논문에서는 특별히 전력선 임피던스를 측정하지는 않고 임피던스의 변화 범위가 0.5mΩ~10.Ω사이를

갖는다고 가정하고 PC를 통한 시뮬레이션을 수행했다.

4) 전력선상에서의 잡음

본 학과전물내의 110V 단상 2선식 회로 선로상에서 존재하는 잡음을 측정하였다. 잡음 샘플의 신뢰성을 높이기 위해서 시간의 변화에 따라 측정을 하였고 측정된 잡음의 평균값을 적용하였다. 이때 전력선에 연결된 전기 기기로는 컴퓨터, 냉장고, 히터, 충전기, 라디오, 스탠드등이 있었다. 잡음은 잡음의 특성을 분석하기 위해서 주파수(FFT) 분석을 하였고, 잡음이 갖는 잡음 전력 밀도(single side power spectral density)값을 구하였다.

잡음을 측정하기 위해서 10kHz 차단주파수를 갖는 고역 통과 필터를 입력단에 연결하고 실제 통신이 이루어지는 대역(95KHz~148.5KHz)사이에서의 잡음특성을 분석하였다. 또한 측정된 잡음을 계산할 때 coupling 회로에서는 신호의 감쇄가 없는 이상적인 회로로 가정했다.

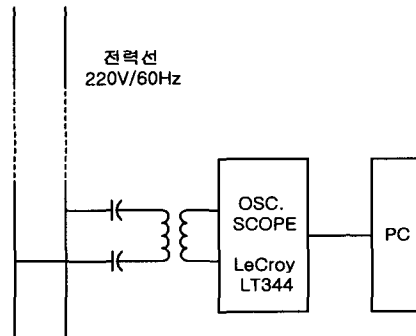


그림 6. 전력선에서의 잡음 측정
Fig. 6. The test circuit of power line noise.

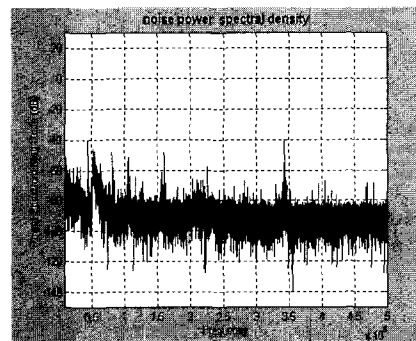


그림 7. 전력선 상에서 존재하는 평균 잡음 특성 곡선
Fig. 7. The characteristic curve of average noise power spectral density on power line.

3. 전력선에서의 통신 용량 계산

본 논문에서는 현재에 전력선 상에 존재하는 시간의 변화에 따른 잡음 평균값과 망 구조에 따른 신호감쇄 특성을 이론적 수식에 대입한 형태로 이루어졌고, 이것으로 기본적인 채널을 위한 채널 용량을 계산하였다. 현재 측정된 잡음에서 구한 잡음 전력 밀도(single side power spectral density)가 갖는 최대, 최소값을 경계조건으로 대입했으므로 어떠한 전력선 채널의 채널용량도 이러한 조건안에 놓인다. 이것으로 Shannon-hartley의 채널용량 계산식(5)을 계산한다.

$$C = W \log_2(1 + \frac{S}{N_o W}) [bits/s] \quad (5)$$

식(5)에서 W는 CENELEC규약에 의해서 53.5KHz (148.5KHz-95KHz)이고 S는 수신신호의 전력(power), No는 수신단에서의 백색잡음의 잡음 전력 밀도(single side noise power spectral density)이다.

CENELEC규약에서는 최대 출력전력을 정의한 것이 아니라 최대 송신 출력전압을 규정하고 있다. 통신하고자 하는 밴드인 C-band에서는 116dB(uV), 즉 0.63V를 초과해서는 안된다. 또한 논문^[14]에서 규정하였듯이 전력선 임피던스값은 수 많은 전기 기기가 전력선에 병렬로 연결되어 있기 때문에 0.5mΩ~10Ω범위값을 갖는다. 하지만 본 논문에서는 기본적으로 거리와 대역폭변화에 따른 채널용량의 변화에서는 전력선이 갖는 임피던스를 1Ω으로 생각하고 채널 임피던스 변동범위에 따른 통신용량에 대한 해석을 실시했다.

전력선 채널 임피던스가 매우 작기 때문에 송신기의 출력은 $S_{TR} = \frac{0.63^2}{|Z_{RPC}|}$ 에 의한 것보다 보통 더 높다. 사실상 송신기가 매우 높은 출력 크기(level)에서 송신하지 않는다면 일반적으로 송신기의 출력은 전력선 망의 임피던스가 매우 작기 때문에 최대의 송신 출력과 같을 것이다. 그러므로 송신기의 출력은 coupling 손실이 발생하지 않는다고 가정하면 0.63²watt와 같다고 추정할 수 있을 것이다. 그래서 최종적으로는 전력선 임피던스와 무관하게 송신기의 출력은 0.632watt로 한다.^[1]

임피던스와 거리에 따른 해석을 수행할 때에는 0.5mΩ~10Ω 범위값을 가지며 변화하는 전력선에서의 채널용량도 고려했다. 이때 1Ω보다 작은 임피던스를 대

입하는 것은 실제적인 송신출력을 벗어나므로 제외했다.

전력선 채널에서 송신 신호는 채널모델에서 정의했던 잡음과 전달함수특성에 의해서 감쇄된다. 채널용량에 대한 수식에 의해서 수신신호는 채널 모델링에서 일반적으로 송신 신호와 전달 함수간의 컨볼루션인 $S=ST(t)*h(f,t)$ 으로 표현할 수 있다. 여기에서 기본적으로 전력선 통신 채널 C band에서 최대로 실을 수 있는 최대전압은 0.63V이고 전달함수는 Network Analyzer로 주파수영역에서 바로 측정했으므로 수신신호의 수신 출력은 $|S_T(f)|^2 \times |H(f)|^2$ 으로 표현 가능하다. 그러므로 수식(5)에 의해서 전력선에서 나타나는 평균 수신 신호의 출력(power)은 채널(A-B),(A-C),

(A-D)에 따라서 수식(6),(7),(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$S = (\frac{0.63}{Z_{RPC}} \times e^{-0.00543d})^2 [W] \quad (6)$$

$$S = (\frac{0.63}{Z_{RPC}} \times e^{-0.00731d})^2 [W] \quad (7)$$

$$S = (\frac{0.63}{Z_{RPC}} \times A + Bd + Cd^2 + Dd^3)^2 [W] \quad (8)$$

$$(A=0.955, b=-0.009, c=5.073e-05, d=-8.124e-08)$$

또한 전력선에서 측정되는 잡음의 전력 밀도(power spectral density)가 갖는 범위는 그림7과 같다. 이때의 결과 범위는 입력 필터에서 감쇄되는 성분이 없는 이상적인 고역 통과 필터를 통과한 잡음특성이라고 가정했다. 측정된 잡음의 전체적인 특성은 그림 7과 같이 낮은 주파수에서 잡음의 세기가 강하고 높은 주파수에서 잡음에 세기가 약한 것으로 나타났다. 그림7에서 측정된 잡음을 백색잡음(AWGN)으로 설정하기 위해서 잡음의 최대,최소값을 그림 8과 같이 설정한다.

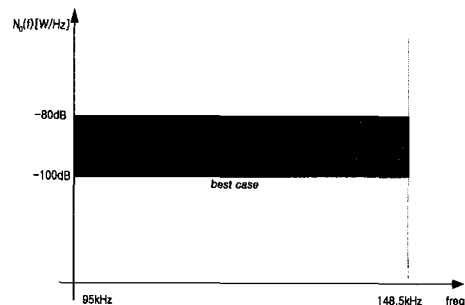


그림 8. 잡음이 갖는 단측 전력 스펙트럼 범위
Fig. 8. The single side power spectral density.

이러한 측정결과를 가지고 Shannon-Hartley가 정의한 채널용량을 채널의 감쇄 유형이 비슷한 망 구조 A-B와 A-C에서 계산하면 식(9),(10)와 같고

$$C_{best} = 53500 \times \log_2 \left(1 + \frac{\left(\frac{0.63}{Z_{RPC}} \times e^{-0.00543d} \right)^2}{10^{-10} \times 53500} \right) \quad (9)$$

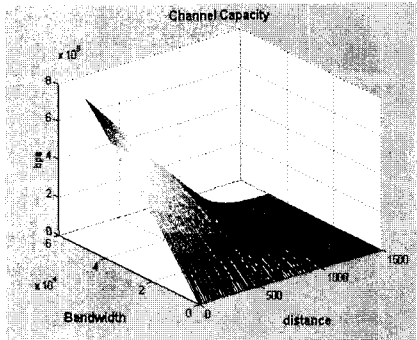
$$C_{worst} = 53500 \times \log_2 \left(1 + \frac{\left(\frac{0.63}{Z_{RPC}} \times e^{-0.00731d} \right)^2}{10^{-8} \times 53500} \right) \quad (10)$$

radial network 구조(A-D사이)에서는 식(8)을 적용한 수식(11),(12)와 같다.

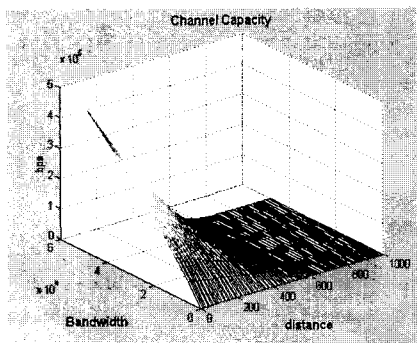
$$C_{best} = 53500 \times \log_2 \left(1 + \frac{S^2}{10^{-10} \times 53500} \right) \quad (11)$$

$$C_{worst} = 53500 \times \log_2 \left(1 + \frac{S^2}{10^{-8} \times 53500} \right) \quad (12)$$

1) 통신대역을 고려한 채널용량
전력선 임피던스의 값이 1Ω을 가진다고 가정하고



① Best Case인 경우

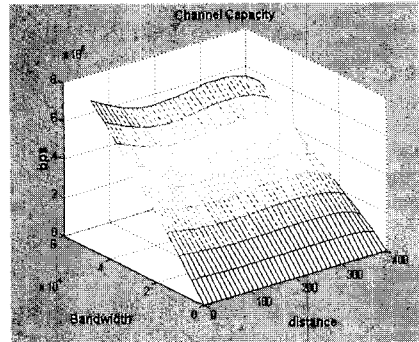


② Worst Case인 경우

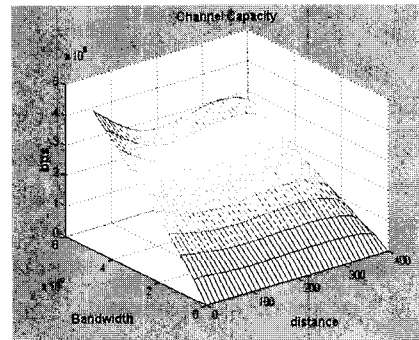
그림 9. 거리와 대역폭의 변화에 따른 채널용량특성 [A-B,A-C]

Fig. 9. The characteristics of channel capacities to distance and bandwidth [at A-B,A-C].

기본적인 거리의 변화와 대역폭 증감에 따른 해석결과는 그림 9와 같다. 이때의 전력선 그림 9의 (a),(b)에서 보듯이 대역폭이 증가될수록 채널용량이 증가함을 볼 수 있고 거리가 증가함에 따라서 채널용량은 대략적으로 지수함수의 형태를 가지고 감쇄하는 것을 볼 수 있다.



① Best Case 인 경우

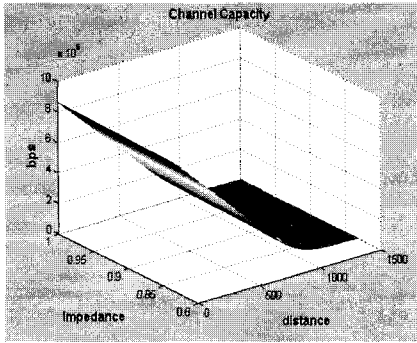


② Worst Case인 경우

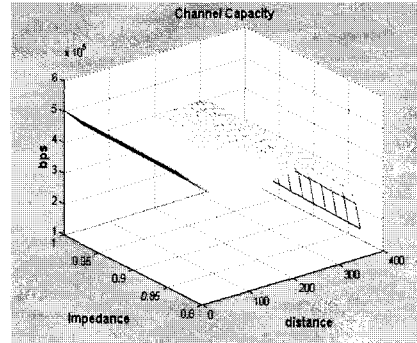
그림 10.거리와 대역폭의 변화에 따른 채널용량 특성 [A-D]

Fig. 10. The characteristics of channel capacities to distance and bandwidth [at A-D].

2) 전력선의 임피던스 변화를 고려한 채널용량
대역폭이 95KHz에서 148.5KHz인 채널상에서 전력선의 임피던스의 크기가 0.5mΩ에서 10Ω으로 변화한다고 가정하고 거리에 따른 채널용량의 변화는 그림11과 같다. 이때의 대역폭은 전체의 통신대역인 53.5kHz를 갖는다고 가정했을 때의 결과이다. 전력선 임피던스 변화에 따른 채널용량의 변화는 크게 영향을 주지 않으며 거리가 증가함에 따라서 채널용량이 크게 변화하는 것으로 나타났다.



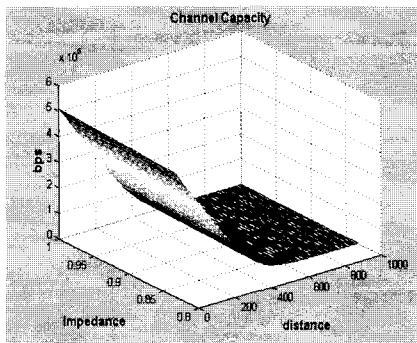
① Best Case인 경우



② Worst Case인 경우

그림 12. 거리와 임피던스변화에 따른 채널용량특성 [A-D]

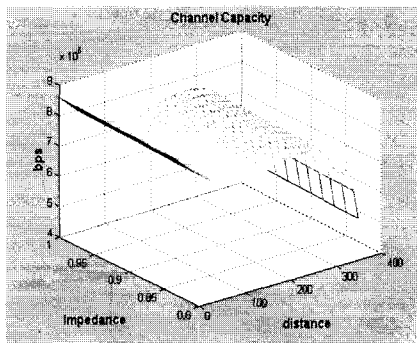
Fig. 12. The characteristics of channel capacities to distance and impedance [at A-D].



② Worst Case인 경우

그림 11. 거리와 임피던스변화에 따른 채널용량특성 [A-B,A-C]

Fig. 11. The characteristics of channel capacities to distance and impedance [at A-B,A-C].



① Worst Case인 경우

III. 결 론

옥내 배선 구조에서 가장 대표적인 형태인 radial network에서 망 구조에 따른 신호의 감쇄량과 전력선에 존재하는 잡음을 일정 기간 동안 규정된 시간에 측정 후 측정데이터(data)의 평균값을 적용해서 이론적인 Shannon-Hartley 채널용량수식에 대입함으로써 옥내 배선구조에서 가지는 통신용량을 계산했다.

전력선을 통신채널로 사용했을 때의 특징은 망구조에 관계없이 전송 거리가 증가할수록 채널용량은 지수 형태로 감쇄하고, 대역폭이 증가할수록 채널용량이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 전력선의 임피던스의 변화가 발생한다 할지라도 전체적인 채널용량의 변화는 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다.

전력선을 통신채널로 사용했을 때 가장 영향을 끼치는 요소는 송신기와 수신기사이의 거리 성분임을 볼 수가 있었다. 전력선이 통신채널로써 사용되어질 때 잡음의 성분이 가장 많이 포함되고 망 구조가 A-D인 곳에서 신호의 전송거리가 400m인 곳이 측정된 곳[본학과 건물]에서가장 최악의 조건이라고 볼 수 있다.

이와 같이 최악의 조건일 경우 건물 내에서 전력선을 통신채널로 사용함으로써 얻을 수 있는 채널 용량 값은 대략적으로 35kbps를 가지는 것을 볼 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Olaf G.Hooijen, "A Channel Model for the Low-voltage Power-line Channel ;Measurement and Simulation Results", ISPLCA97, pp.51-56, April 1997.
- [2] J.Onuga and R W. Donaldson, "Personal Computer Communications on Intra building Power Line LANS Using CSMA with Priority Acknowledgment", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol7, n0.2, pp.180-191, Feb 1989.
- [3] Olaf G.Hooijen, "On the relation Between Network-Topology and Power Line Signal Attenuation", ISPLCA98, pp.45-56,1998.
- [4] R.M.Vines et al., "Impedance of the Residential Power Distribution Circuit", IEEE Transactions on Electromgnetic Compatibility, vol.27, no.1, pp.6-12, Feb 1985.
- [5] Holger Philipps, "Performance Measurements of Power line Channels at High frequency", ISPLCA98, pp.229-237, 1998.

저 자 소 개



朴 鍾 演(正會員)

1951년 2월 23일생. 1973년 2월 고려대학교 전자공학과(공학사). 1980년 2월 경북대학교 전자공학과(공학석사). 1984년 2월 경북대학교 전자공학과(공학박사). 1973~1977년 KIST 연구원. 1977~1984년 울산공과대학 조교수, 부교수, 1984년~현재 강원대학교 전기공학과 교수. <주관심분야 : 전력선통신, 디지털신호처리>



曹 桂 鉉(正會員)

1973년 3월 27일생. 1998년 2월 강원대학교 전기공학과(공학사). 2000년 2월 강원대학교 전기공학과(공학석사). 2000년 3월 강원대학교 전기공학과 박사과정. <주관심분야 : 전력선통신, 디지털 신호처리>