

## 전력선 통신 채널의 단 구간 변화에 대한 분석

### An analysis of the short-term variation of the power line as a communication channel

박종연\*      최원호\*\*      정광현\*\*\*  
Park, Chong-yeon      Choi, Won-Ho      Jung, Kwang-Hyun

---

#### Abstract

The power line channel has time-variant characteristics caused by various kind of electrical devices. This characteristics are synchronized with the main voltage by their own characteristics. The main factors of disturbance are the variation of the channel impedance and noises. In other papers[2][3], the synchronous noise modeling has been achieved. But the modeling is not satisfied simultaneously with the time domain and the frequency domain and there are not any discussion about short-term variations of the channel impedance which cause to the signal fading. Therefore, this paper researched to solve problems about the signal fading by analyzing the short-term variation of the channel impedance, and proposed the synchronous noise modeling which is satisfied simultaneously in the time domain and the frequency domain.

키워드 : 전력선 통신, 채널분석, 노이즈

Keywords : *power line communication, channel analysis, noise*

---

#### 1. 서론

최근 세계적으로 전력선 통신기술을 홈 네트워킹(Home networking), 원격자동제어 등에 적용하여 상용화하기 위한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 그러나 전력선의 채널로서의 악조건 때문에 발생하는 문제들로 인하여 상용화에는 아직 어려움이 있다. 일반적으로 전력선 통신은 각종 기기들을 제어하고 상태를 체크하기 위한 저속 전력선 통신과 PC와 주변기기간의 데이터 통신 및 동영상/이미지를 전송하기 위한 고속 전력선 통신으로 나눌 수 있으며, 이 두 가지 상황 하에서 전력선은 서로

다르게 분석되어야 한다. 본 논문은 전자의 통신환경에서의 채널에 대한 분석을 다루었다.

기존의 꾸준한 연구들에 의하여 현재까지 밝혀진 바에 의하면 신호감쇠의 원인은 전력선에 연결된 부하로부터 발생된다고 알려져 있다[1]. 전력선 통신에서 신호의 감쇠는 잡음에 의한 감쇠와 전력선 임피던스 변화에 따른 임피던스 미스매칭(mismatching)에 의한 감쇠로 나눌 수 있으며, 이것은 전원 주파수에 동기되어 나타나는 것과, 부하들의 사용여부에 따라 나타나는 것으로 구분할 수 있다.

기존의 연구들은 대부분 주기적 신호감쇠의 원인을 대부분 잡음으로 규정하여, 그 잡음을 분석하여 모델링 하고 있다[1]-[7]. 그러나 이러한 모델링들이 실제 잡음을 시간영역과 주파수영역을 동시에 모델링 하지 못하고 있으며, 신호감쇠의 다른 원인인 임피던스 변화에 따른 원인에 대하여 논의가 이루어지지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 신

---

\* 강원대학교 전기전자공학부 교수, 공학박사  
\*\* 강원대학교 대학원 전기전자공학부 박사과정  
\*\*\* 강원대학교 대학원 전기전자공학부 석사과정

호감쇠에 요인 중 하나인 임피던스 변화에 대하여 그 원인을 분석하여 그 해결책을 제시하고, 실제 잡음에 대하여 시간영역 및 주파수영역을 모두 만족하는 노이즈 모델링 방법을 제안하였다.

## 2. 부하의 특성에 따른 채널의 임피던스 변화

전력선에는 여러 가지 부하들이 연결되어 있어 전력선을 채널로 사용할 때 채널의 특성은 부하들에 의하여 결정된다. 따라서 변화에 영향이 큰 부하들의 구조를 파악하여야 한다. 본 논문의 관점 중 하나인 주기적 임피던스 변화에 큰 영향을 미치는 부하는 여러 가지 부하로 측정해 본 결과 입력단에 전파정류 회로가 직접 붙어있는 경우로 나타났다.

### 2.1. 부하의 구조 및 영향

대부분의 기기들은 부하에 전력을 공급하기 위하여 전력선에서 공급받은 AC를 DC로 변환하여 공급하는 장치가 필요하므로 대부분의 기기들이 그림1과 같은 전파정류 회로를 사용한다. 전파정류 회로에는 평활한 DC를 얻기 위하여 평활 커패시터인 C1이 필수적이며, 큰 커패시터 값을 사용하게 된다.

전파정류회로는 그림 1의 아래 그림과 같이 입력전압이 출력 DC 전압보다 작아 질 때(Tc)에만 D1,D4 혹은 D2,D3 두개의 다이오드가 서로 교번하며 도통하여 전류를 부하로 흘려주게 된다. 이때 부하가 원하는 전력을 공급하기 위하여 전류는 순간적으로 많이 흐르게 되고, 또한 전력선 측에서 볼 경우 Tc에는 C1이 순간적으로 보이게 된다.

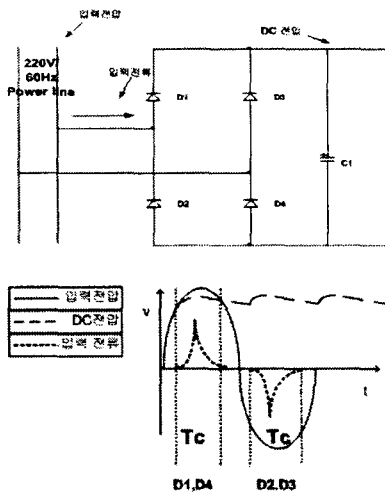


그림 1 전파정류 회로와 동작 파형

Tc의 순간에 보이는 C1은 결국 그림2에서 나타낸 것처럼 전력선 채널의 기존 임피던스를 순간적으로 변화시키게 된다. 커패시터가 병렬로 연결되는 것은 결국 전체의 임피던스를 낮게 만드는 것을 의미하며, 이것은 순간적으로 전류가 많이 흐르기 때문이라고도 할 수 있다. 따라서 Tc의 순간에는 송신된 신호가 수신측에 감쇠되어 나타나게 된다. C1에 의한 신호의 감쇠는 기존 채널의 임피던스에 따라 상대적으로 영향을 미치게 되며, 전원 주기에 동기되어 전원 주파수의 2배의 주파수로 나타난다.

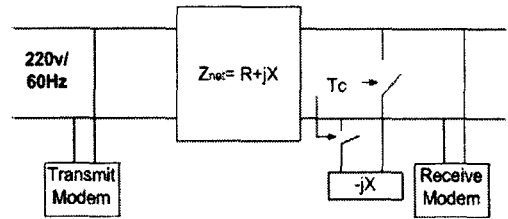
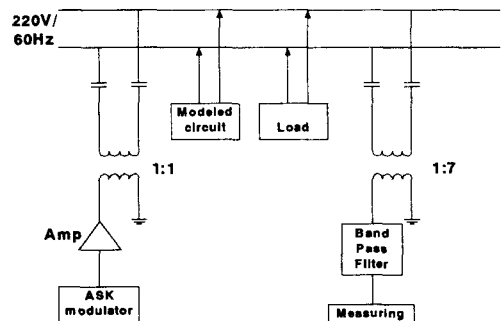


그림 2 부하의 영향에 의한 전력선 채널의 간단한 모델링

### 2.2. 실험 및 측정

앞장에 설명한 것과 같이 부하의 입력단 구조를 모델링한 임피던스와 실제의 부하를 놓고 측정을 하였을 때 신호의 감쇠 정도로서 모델링이 정확하게 되었는지 알 수 있다. 따라서 그림 3(a)와 같이 실험환경을 구성하였다. 그림에 나타낸 것처럼 송신 시 출력 단에는 증폭기를 두고 수신 단에 커플링 트랜스포머의 턴수비를 다르게 하여 신호의 측정이 잘 되도록 하였다. 또한, 수신단의 밴드패스 필터를 거쳐 다른 노이즈에 의한 영향을 배제하도록 하였다. 송신된 신호는 125kHz의 캐리어(carrier) 주파수를 가지도록 ASK(Amplitude Shift Keying) 복조된 신호이다. 모델링 및 실험된 부하는 CFL(Compact Fluorescent Lamp)를 택하였고, 그 입력 단 구조는 그림 3(b)와 같이 그림1의 구조에서 입력 단에 고주파를 위한 커패시터가 추가되어 있는 형태이다.



(a)

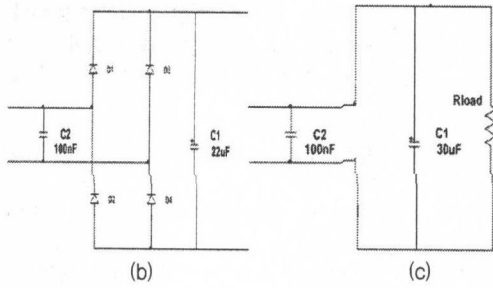


그림 3 (a) 측정된 회로 (b) 부하의 구조 (c) 모델링 된 부하

실험을 위하여 그림3(c)와 같이 모델링 하였다. 실제 실험 시 C1의 값은 30uF를 사용하여 실제 부하로 측정된 값 보다 감쇠가 더 크게 나타났다. 측정된 파형은 다음의 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 실제 부하로 측정된 것이며, 전원 주기의 peak 지점 즉, 그림 1의 Tc의 지점에서 신호의 감쇠가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 그림 4(b)는 모델링 된 부하로 측정된 것으로써, Ton의 시간에서 모델링된 회로를 전력선에 병렬로 연결하여 측정된 것이다.

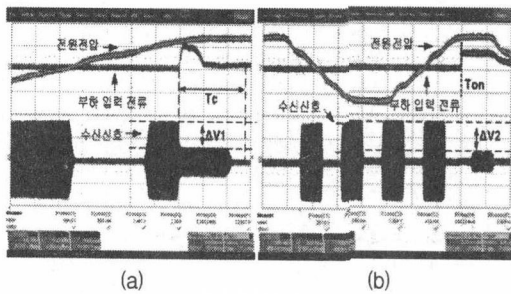


그림 4 (a) CFL 부하 (b) 모델링 된 부하

측정 결과는 다음과 같다.

실제 부하의 감쇠된 양  $\Delta V1 = 2.3V$

모델링 부하의 신호의 감쇠된 양  $\Delta V2 = 2.6V$

$\Delta V1$ 과  $\Delta V2$ 의 차이는 모델링 시 C2의 값에 따른 차이이다.

### 2.3. 분류 및 개선방법 논의

일반적으로 용량이 큰 부하의 경우 커패시터의 값이 용량이 작은 부하에 비하여 크므로, 부하를 용량에 따라 분류하고 입력단 평활 커패시터 값을 표1에 나타내었다.

Tc의 순간에 보이는 커패시터의 영향을 적게 하기 위해서는 전력선과 부하의 사이에 알맞은 보상 임피던스를 추가하여 커패시터의 영향을 상쇄시켜야 한다. 이는 전력선과 부하의 사이에 분류에

따른 알맞은 인덕터를 직렬로 삽입하여 이루어 낼 수 있다. 즉, 다음의 그림 5와 같이 나타낼 수 있으며, 표 1에 내부 커패시터 값에 따른 분류에 맞게 고상되는 임피던스 또한 나타내었다.

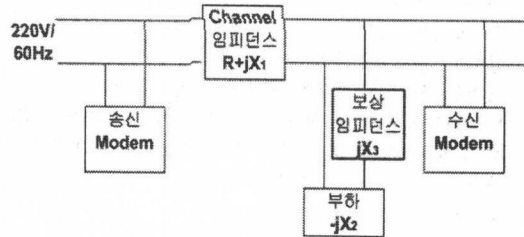


그림 5 부하의 임피던스 보상

표 1 부하에 따른 분류와 보상 임피던스

부하의 분류	평활 커패시터 값	추가 보상 임피던스
light	10uF 이하	영향이 적음
normal	10uF ~ 100uF	80uH
heavy	100uF 이상	10uH •

normal과 heavy로 분류된 부하(평활 커패시터 220uF, 220uF)를 놓고 표 1에 값에 따라 임피던스를 보정한 후 실험된 파형은 그림 6과 같다. 그림 6의 (a)는 normal 일 때, (c)는 heavy 일 때 수신된 신호의 파형이며, (b),(d)는 각각 표1에 따라 임피던스를 보정한 후 수신된 신호의 파형이다.

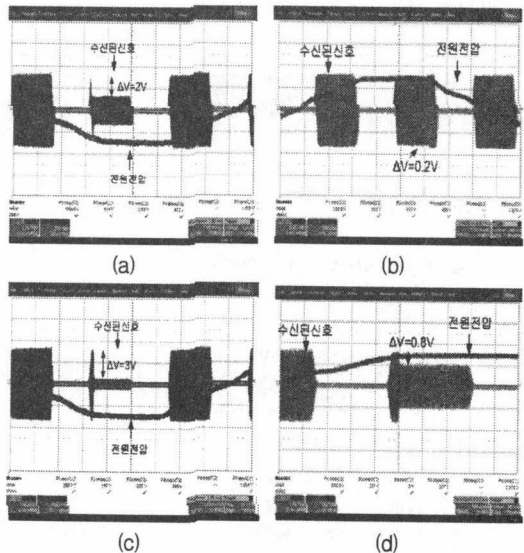


그림 6 (a) 수신된 파형(normal) (b) 보상된 파형(normal) (c) 수신된 파형(heavy) (d) 보상된 파형(heavy)

그림6에서 보듯이 부하의 내부 커패시터로 인한

신호의 감쇠  $\Delta V$ 가 보상 임피던스로 인하여 작아진 것을 알 수 있으며, 구현 시 부하 전류로 인하여 인덕터가 포화되지 않도록 임피던스를 구현하여야 한다. 위와 같은 방법 이외에 채널의 주기적인 임피던스 변화에 맞추어 송신 신호의 전력을 변경하는 방법이 있다. 신호감쇠의 시점에서 송신신호의 전력을 충분히 크게 해준다면, 수신측에서 신호의 감쇠는 일어나지 않은 것처럼 보일 것이다. 따라서 보상임피던스를 사용하는 방법 외에 신호의 감쇠  $\Delta V$ 로써 송신 신호의 전력을 조절하는 시스템을 구성하여 주기적인 신호감쇠의 문제를 해결할 수 있을 것이다.

### 3. 전력선 채널의 잡음

통신에서 어려움을 높이는 가장 큰 원인 중 하나는 잡음이다. 전력선 채널에서는 여러 가지 부하에 의해 다양한 형태의 잡음이 나타나며, 전원주파수에 동기되어 나타나는 것이 특징적이다. 따라서 본 논문에서는 기존 논문들을 인용하여[2][3], 시간영역에서의 잡음을 수식적으로 표현하여, 모델링한 후, 그것의 개선된 모델링을 제안 하도록 하겠다.

#### 3.1. 전력선 채널의 시간영역에서의 잡음

주파수 영역에서의 해석이 아닌 시간 영역에서의 잡음 특성을 [2][3]에서 소개하고 있다. 이에 따르면, 시간영역에서 관찰된 전력선 잡음의 PDF를 아래의 (1)식과 같이 가정한다.

$$P(N(iT_s)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2(iT_s)}} \exp\left(-\frac{N^2(iT_s)}{2\sigma^2(iT_s)}\right) \quad (1)$$

또한, 아래의 세 가지 노이즈의 합성으로 표현된다.

- ① cyclic continuous noise  
- cyclo-stationary Gaussian
- ② cyclic impulsive noise  
- cyclo-stationary Gaussian
- ③ time-invariant continuous noise  
- stationary Gaussian

여기서 time-invariant continuous noise는 cyclic continuous noise 나 cyclic impulse noise 보다 작은 크기로 나타내며, 나머지 두 가지 잡음이 주로 전력선 잡음의 특징을 나타내는 잡음이라 볼 수 있다. 이 잡음들이 Cyclo-stationary Gaussian process 라는 가정을 통하여 식(2)와 같이 잡음의 분산 주기성을 표현하였다. 잡음의 평균은 0으로 가정한다[3]. 식(2)에서 K는 잡음에 따라

다르지만 주로 3이면 잡음을 표현하는데 충분하다. 즉, 잡음의 모델링은 각각의 k에 대한 A와  $\theta$  그리고 n의 총 9개의 계수를 구함으로써 이루어질 수 있다.

$$\sigma^2(t) = \sum_{k=0}^{K-1} A_k |2\pi f_A t + \theta_k|^{n_k} \quad (2)$$

이렇게 모델링된 전력선의 잡음은 시간영역에서는 만족할 만한 특성 표현이 가능하지만 주파수영역에서는 그 형태가 조금 상이하다. 왜냐하면 모델링된 잡음은 백색잡음의 형태를 띠고 있기 때문이다. 그러므로 본 논문에서는 이렇게 만들어진 주기적 잡음이 가지는 주파수 분포가 시간에 따라 어떠한 분포를 가지는지를 분석하였으며, 이를 통하여 잡음을 주파수 영역에서도 실제와 근접하도록 하는 모델링 방법을 제안하였다. 또한 잡음에 가장 방해될 적게 받는 송신시점과 그 시점에서 피해야 하는 주파수를 분석하였다. 이러한 정보는 단일 캐리어의 저속 통신에서는 최적의 송신시간과 주파수를 선택하는데 활용될 수 있으며, 현재 각광 받고 있는 다중 캐리어 변조 방식을 적용할 때 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 3.2. 전력선 채널 잡음의 모델링

이전의 섹션에서 밝힌 임피던스 변화와 관련하여 전력선의 잡음이 전력선의 주 전압(220V/60Hz) 및 부하에 의한 전류 흐름과 관련이 있다고 판단하였기 때문에 그림 7의 구조로 전력선의 전원 전압과 함께 채널 내의 잡음을 측정하였다. 측정 시 샘플링 주파수는 2MHz, 샘플의 개수는 총 100002개이다.

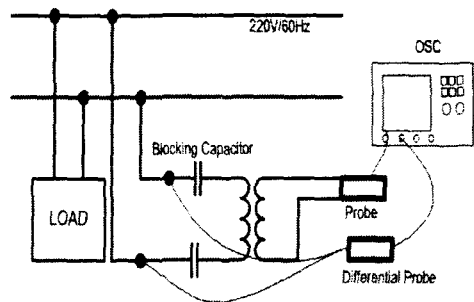


그림 7 실험 구성도

그림 7의 실험 구성도에서 부하를 연결하지 않고서 측정된 잡음은 그림 8과 같은 형태를 지니고 있었다. 이러한 잡음의 시간에 따른 분산을 전원전압의 반주기 동안 살펴본 그림은 그림 8과 같으며 이를 여 구한 모델 식(2)에서의 계수 추정 결과는 표2와 같다.

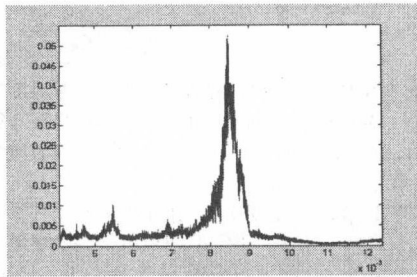


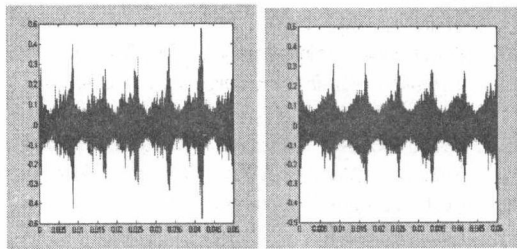
그림 8 전력선 잡음에 대한 시간에 따른 분산의 평균 예

표 2 잡음모델 분산 식의 계수

$l$	$A_l$	$\theta_l$	$n_l$
0	0.0123	-	0
1	0.03112	2	1.8
2	0.0516	-35	1200

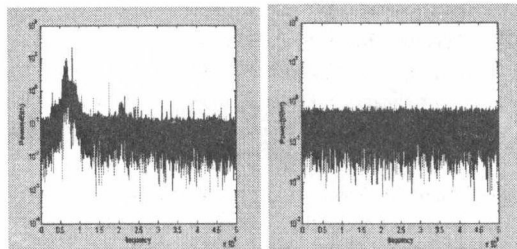
### 3.3. 모델링 된 잡음과 실제잡음과의 비교

그림3에서 표2를 통하여 모델링 한 잡음을 시간 영역에서와 주파수 영역에서의 실측된 잡음과 각각 비교하였다. 시간영역에서 관찰한 실측된 잡음인 그림 9(a)와 모델링 된 잡음인 그림 9(b)는 거의 비슷한 형태를 지니고 있다. 그러나 주파수 영역에서의 실측된 잡음인 그림 9(c)와 모델링된 잡음 그림 9(b)는 매우 다른 형태를 가지는데 이는 모델링된 잡음이 실제와 다르게 주파수에 대하여 균일한 확률을 가진다고 가정하였기 때문이다.



(a)

(b)



(c)

(d)

그림 9 전력선 채널의 잡음 (a) 측정된 잡음-시간 (b) 모델링 된 잡음-시간 (c) 측정된 잡음-주파수 (d) 모델링 된 잡음-주파수

실측된 잡음의 PSD(Power Spectral Density)인 그림 9(c)를 살펴보면 특정 대역에 잡음 에너지가 집중되어 있는 점을 발견 할 수 있다. 즉, 기존의 잡음 모델로는 실제 잡음과 차이를 나타낸다. 또한, 특정 주파수의 노이즈 들이 발생하는 시점도 기존의 분석으로는 나타나지 않는 특성이다. 이를 알아보기 위하여 220V/60Hz의 전원 전압의 한 주기 간 Wavelet 변환을 통한 시간-스케일 분석을 하였으며 결과가 그림 10이다.

그림 10(a)는 전력선 채널의 주 전압(220V/60Hz)이며 시간축의 시작은 주 전압의 영전위 교차 지점과 일치한다. 그림 10(b)는 잡음의 주파수별 전력분포를 시간에 따라 나타낸 그림이며, 색이 밝을수록 크기가 크다는 것을 의미한다. 그림 9에서도 관찰할 수 있듯이 전력선에서는 주 전압의 영전위 근처에서 임펄스 성 잡음이 발생한다. 그림 10(b)에서도 주 전압의 영전위 부근에 약 60 ~ 100kHz의 잡음이 집중되어 있음을 볼 수 있다. 또한 가장 잡음이적은구간은 메인 전압의 영전위 교차 시점 직후부터 peak 부근 까지임을 확인 할 수 있다.

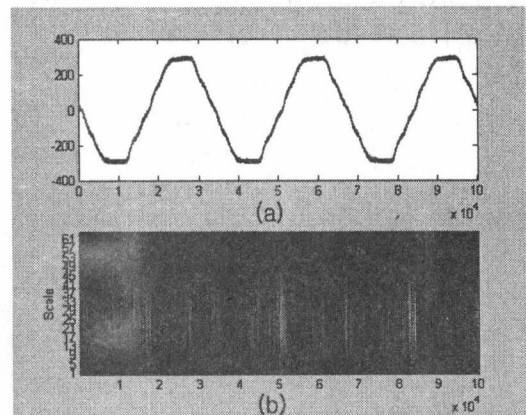


그림 10 전력선 잡음의 시간에 따른 주파수 분포

앞의 두 가지 사실 즉, 전력선의 잡음은 백색잡음의 형태가 아니며, 전원전압에 동기화 되어 특정 구간에서만 발생한다는 점은 기존과 다르게 시간에 따른 주파수 선택적 특성을 모델에 추가하여야 함을 의미한다.

표 3 잡음형태에 따른 발생원

잡음형태	대표적 발생원	특징
A	Switching Devices (SCR, Power Supply)	전원 고조파 성분의 라인 스펙트럼
B	Universal Motor (Electrical Drill, etc.)	White Noise
C	램프 등의 인버터 기기	특정 주파수 대역에 잡음이 집중됨
D	Television Receiver	선 스펙트럼을 보임

### 3.4. 전력선 채널 잡음 모델의 개선

앞서 구해진 전력선 채널 잡음  $n(t)$ 의 주파수 분포는 균일하다. 잡음의 랜덤성은 선형시스템을 거쳐도 변화되지 않으므로  $n(t)$ 을 특정 주파수성분들이 강조된 잡음 필터  $H_N(f)$ 에 통과시킴으로써 실제 잡음과 매우 유사한 개선된 잡음  $n'(t)$ 의 모델을 만들어 낼 수 있다.

전력선의 배경잡음 즉, 백색잡음에 비하여 상대적으로 크기가 큰 잡음은 부하에 의하여 발생함 기존 연구 [4][5]에 의하여 밝혀져 있으므로 부하가 발생시키는 주파수 스펙트럼  $S_{Load}(f)$ 으로서 아래의 그림 11과 같은 방법으로 잡음필터의 전달함수  $H_N(f)$ 를 구할 수 있다. 가정에서 발생하는 주요한 잡음의 발생원으로는 표 3과 같이 직/교류 겸용 모터(Universal Motor), 불 밝기 조절기(Light Dimmer), 전원 공급기(Power Supply) 등이 있으며, 특히 불 밝기 조절기에 의한 잡음은 직/교류 겸용 모터에 의한 잡음보다 통신에 더욱 악영향을 미치는 특성이 있다[4]. 각각의 부하에 따른 잡음 스펙트럼을 규정화 하여  $H_N(f)$ 를 만들면 보다 더 정확한 잡음 모델을 구현 할 수 있다. 이에 근거하여 개선된 잡음의 모델은 그림 12에 나타내었다.

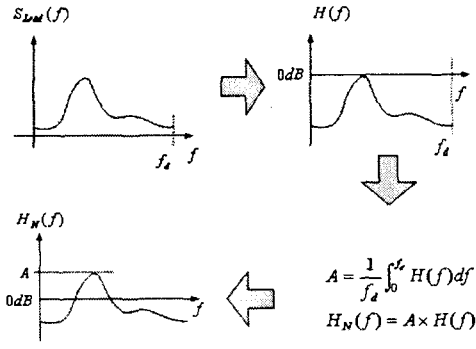


그림 11 잡음필터의 전달함수 모델링

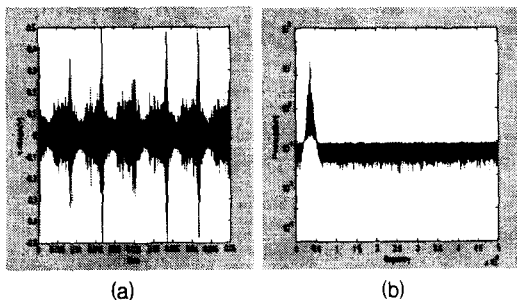


그림 12 개선된 잡음 모델 (a) 시간영역 (b) 주파수영역

### 4. 결론

본 논문에서는 전력선 채널의 전원에 동기되어 나타나는 주기적인 변화에 따른 통신의 방해요인을 임피던스 변화와 노이즈의 두 가지 측면에서 분석하였다.

주기적인 임피던스 변화는 임피던스 미스매칭에 의한 주기적인 신호의 감쇠의 원인이 되며, 변화의 원인은 부하에 있다. 에러율을 낮추기 위하여 이러한 영향을 줄여야 하는데, 이것은 부하에 보상임피던스를 추가하여 영향을 줄일 수 있으며, 다른 방법으로는 임피던스 매칭을 자동적으로 할 수 있는 adaptive coupler를 사용하여 영향을 줄일 수 있다. adaptive coupler에 대한 연구는 향후 지속적으로 연구되어야 할 과제이다.

전력선 채널의 잡음은 부하에 의하여 전원 전압과 동기를 이루며 특정구간에 특정대역의 잡음이 집중되어 있는 특징을 보인다. 이러한 특성을 볼 때 에러율을 낮추는 가장 단순한 방법은 잡음이 발생하는 전원전압의 peak 지점을 피하여 영전위 교차점 부근에서만 통신을 하는 것이다. 본 논문에서 제시한 개선된 잡음은 시간영역에서 뿐만 아니라 주파수 영역에서도 잡음의 특징이 잘 묘사되므로 시뮬레이션에 적용 시 보다 더 근접한 모의 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- [1] H. Meng, Y.L. Guan, S. Chen, "Modeling and Analysis of Noise Effect on Broadband Power-Line Communications", *IEEE journal on selected areas in communications*, Vol.24, No.7, JULY 2006
- [2] Osamu OHNO, Masaaki Katayama, Takaya Yamazato, Akira OGAWA, "A Simple Model of Cyclostationary Powerline Noise for Communication Systems", *International Symposium on Power Line Communication*, pp.115~122, 1998
- [3] Masaaki Katayama, Takaya Yamazato, Hiraku Okada, "A Mathematical Model of Noise in Narrowband Power line Communication Systems", *IEEE journal on selected areas in communications*, Vol.24, No.7, JULY 2006
- [4] Roger M. Vines, H. Joel Trussell, Louis J. Gale, J. Ben O'Neal, JR., "Noise on Residential Power Distribution Circuits", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. EMC-26, No.4, November, 1984.
- [5] Masaaki Tanaka, "High Frequency Noise Power Spectrum, Impedance and Transmission Loss of

- Power Line in Japan on Intra-building Power Line Communications”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 34, No.2, May, 1998.
- [6] Kazuhiro MORIYAMA, Hajime KUBOTA, Kohichi SAKANITWA, “Generative Mechanism of Harmonic Noise and Periodic Signal Fading and its Model in Power line communication”, *IEEE International symposium power line communication*, pp.91-104, 1998.
- [7] Francisco Javier Canete Corripio, Jose Antonio Cortes Arrabal, Luis Diez del Rio, Jose Tomas Entrambasaguas Munoz, “Analysis of the Cyclic Short-Term Variation of Indoor Power Line Channels”, *IEEE Journal on selected areas in communications*, VOL. 24, NO.7. pp 1327-1338, JULY 2006.