

PN 시퀀스 방식의 광대역 임펄스 응답 측정을 통한 고압 배전선로 채널 특성 연구

오휘명\*, 최성수\*, 이재조\*, 김관호\*, 황금찬\*\*  
 \*한국전기연구원 전기정보망기술연구그룹 \*\*연세대학교 전기전자공학부

A Study On The Characteristics Of The Medium Voltage Power Distribution Line Channel By Wideband Channel Impulse Response Measurement Using PN Sequence

Hui-Myoung Oh\*, Sung-Soo Choi\*, Jae-Jo Lee\*, Kwan-Ho Kim\*, Keum-Chan Whang\*\*  
 \*KERI(Korea Electrotechnology Research Institute),\*\*Yonsei University

**Abstract** - 전력선 통신(Power-Line Communication)에 있어서 전력선은 유선 매체임에도 불구하고 수많은 분기 및 부하접속, 그리고 상호간의 임피던스 부정합에 의해 무선 통신 채널 환경과 같은 다중 경로 페이딩 특성을 갖게 된다. 따라서 채널의 다중경로 해석이 상당히 중요하며, 실제 전력선 통신 채널 연구 분야에서 신호 송수신단 사이의 임펄스 응답 측정을 바탕으로 다중경로를 분석하는 방안이 적용되고 있다. PN 시퀀스를 이용한 광대역 임펄스 응답 측정 방식은 무선 채널 환경에 대해 개발되었으나, 현재는 무선 채널은 물론 전력선 채널과 같은 유선 채널에서도 적용되고 있다. 게다가 고압 배전선로와 같이 다중 경로를 포함하는 장거리 통신 채널은 PN 시퀀스 방식이 여러 가지 면에서 효율적이다[1].본 논문에서는 PN 시퀀스 방식의 광대역 임펄스 응답 측정 방법을 통해 고압 배전선로 채널의 다중경로 특성을 측정, 검토하고 이를 제시하였다.

1. 서 론

전력선 통신 기술은 홈 네트워크용 옥내 유선 통신 기술로서 국내는 물론 국외에서도 시범 서비스가 시작되어 이미 실용화 단계에 있다. 칩셋과 모뎀에 대한 지속적인 고속화 개발 노력으로, 전력선 통신 기술은 홈 네트워크를 위한 핵심 기술로서는 물론, 액세스 망 구성 기술로서와 고속의 백본 솔루션으로서도 주목받고 있다.

현재 고속 광대역 전력선 통신 칩셋 및 모뎀 개발은 미국, 스페인, 그리고 한국이 주도적으로 진행하고 있으며 200Mbps급의 초고속 솔루션이 올 연말에 출시될 예정이다. 또한, 고속화 된 모뎀기술을 바탕으로 액세스 망 및 백본 개발 경쟁이 가속화 되고 있는 상황에서 경쟁적으로 상용화 서비스를 준비하고 있다.

전력선 통신을 이용한 액세스 망 및 백본은 신호 전송에 사용되는 채널이 기본적으로 고압 배전선로이다. 다른 전력선들과 마찬가지로 고압 배전선로 역시 전력전달을 위한 것이지 통신 데이터 전송용이 아니므로, 통신신호에 대해서는 전송 신뢰성을 보장할 수 없다. 따라서 배전선의 물리적 구조 및 각종 부하들에 따라 다양하게 변화하는 통신 신호의 다중경로 전달 특성, 즉 임펄스 응답 특성을 적절한 측정을 통해 효과적으로 분석하여 모뎀의 동작 범위 설정과 안정적 운용을 보장하는 것이 중요하다.

이에 본 논문에서는, 2장에서 PN 시퀀스 방식의 광대역 채널 임펄스 응답 측정 방식을 소개하고, PN 시퀀스 방식의 실제 구현에 대한 실험성을 간단히 검증하였다. 3장에서는 임펄스 응답 측정에 적용된 실제 배전선로 환경을 소개하고, 각 측정 대상에 대한 측정 결과를 제시, 분석하였고, 4장에서 결론을 맺었다.

2. 전력선 채널 임펄스 응답 측정 방식

2.1 PN 시퀀스 방식

전력선 통신 채널의 임펄스 응답 측정 방식은 시간영역과 주파수 영역, 그리고 측정에 사용되는 신호 및 장비 특성에 따라 여러 가지 방식이 존재한다. 이러한 여러 측정 방식 중에서 PN 시퀀스를 이용하는 광대역 측정 방식은 다중경로 수신 신호의 크기와 위상을 동시에 측정할 수 있으며, 전력선 채널 특히 고압 배전선로와 같은 장거리 채널에 대해 그 적용이 용이하기 때문에 보다 효과적인 채널 측정 방안으로 사용되고 있다[1]. PN 시퀀스 방식은 PN 시퀀스의 자기 상관 특성이 근사적으로 Impulse 형태임을 이용하여 송신측에서 연속적으로 입력되는 PN 시퀀스에 대해 수신측에서 동일한 시퀀스에 대한 상관도를 측정함으로써 임펄스 응답을 얻는다[2,3].

PN 시퀀스를 이용한 광대역 측정 방식에서, PN 발생장치에서 발생된 시퀀스는 반송파에 의해 변조되고 전력증폭기를 거쳐 커플러를 통해 전력선에 입력된다. 전력선 채널을 통과한 신호는 다시 커플러를 통해 저잡음 증폭기를 거쳐 저대역필터링 후 디지털오실로스코프로 수집되어 PC에 저장된다. PC에서는 수집된 신호 정보를 소프트웨어적 처리 과정을 통해 I채널과 Q채널로 구분하여 각각 필터링, 반송파 복조 및 PN 시퀀스 자기상관한다. 이로부터 채널 다중경로 신호의 크기 정보와 위상 정보를 얻게 된다.

그림 1은 제작된 PN 시퀀스 방식 임펄스 응답 측정 시스템에 대한 실험성 검증을 위해 구성한 테스트 채널이다. 테스트 채널은 1m 길이의 동축케이블 2개, 신호 커플러 2개, VCTFK(장원형 비닐 캡 타이어 코드), VCTF(원형 비닐 캡 타이어 코드) 전력선으로 구성된다. 동축케이블은 채널 임펄스 응답 측정 장비와 연결되며, 신호 커플러는 신호선과 전력선 사이의 커플링에 이용되며, 각 전력선은 길이를 다르게 하여 분기와 개회로(open circuit)를 가지도록 구성한다.

2.2 PN 시퀀스 방식 검증 평가

PN 시퀀스 방식의 임펄스 응답 측정의 실험성을 검증하기 위해, 그림 1의 테스트 채널에 대해, 네트워크 분석기를 이용한 측정과 스펙트럼 분석기를 이용한 측정 방식을 적용하여, 이들 결과를 주파수 영역에서 비교하였다.

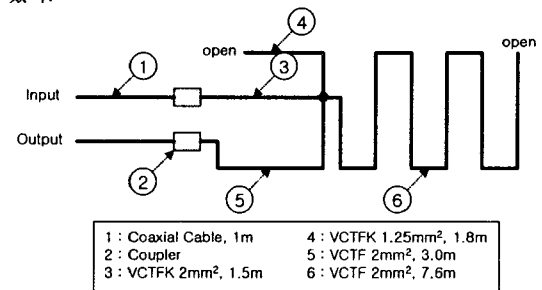
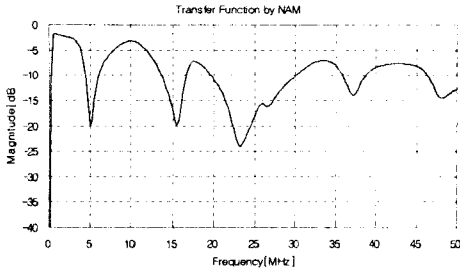
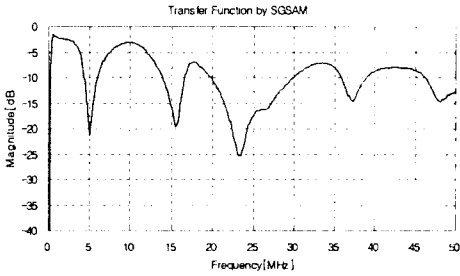


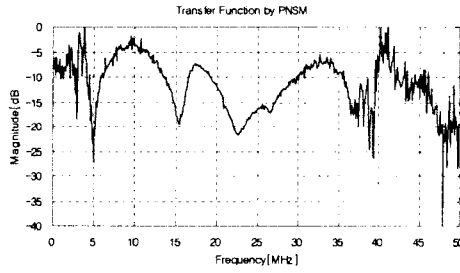
그림 1. 실험성 검증을 위한 테스트 채널



(a) 네트워크 분석기 방식 측정 결과



(b) 스펙트럼 분석기 방식 측정 결과



(c) PN 시퀀스 방식 측정 결과

그림 2. 테스트 채널에 대한 각 방식에 따른 주파수 응답 측정 결과

측정 비교 주파수 대역은 광대역 전력선 통신에 사용되는 1~30MHz 대역이며, 그 외의 대역에 대한 측정 은 고려하지 않는다.

그림 2의 측정 결과로부터, 각 측정 방식은 기본원리 상 모두 같은 결과를 보여주게 된다[4,5]. 따라서 임펄스 응답 측정 방식을 구현하여 실제 전력선 채널 측정에 적용 가능함을 알 수 있다. 단, PN 시퀀스 방식은 5MHz 이하의 대역과 35MHz 이상의 대역에서 다소 왜곡된 결과를 보이는데, 이것은 측정 시스템 구현상에서 사용한 PN 시퀀스의 기저대역 신호 대역폭이 자체적으로 왜곡되어 있기 때문이다. 이러한 현상을 해결하기 위해 보다 짧은 칩(chip : PN 시퀀스의 한 bit 시간)주기를 갖는 PN 시퀀스를 사용함으로써 해결할 수 있다.

### 3. 고압 배전선로 채널 임펄스 응답 특성

#### 3.1 고압 배전선로 채널 측정 대상

그림 3은 전력선 통신 채널로서의 고압 배전선로를 측정 분석하기 위해 구축된 테스트 필드이다. 1번에서 7번 지점까지 구간 별로 4~5개의 전주가 있으며, 특히 하계는 2번 3번 지점 사이에 지중선로가 존재하고, 3번 4번 지점 중간에 3상 선로가 단상 선로로 바뀐다. 각 지점마다 신호 유입선을 연결할 수 있도록 집속식 커플링 장치가 설치되어 있다.

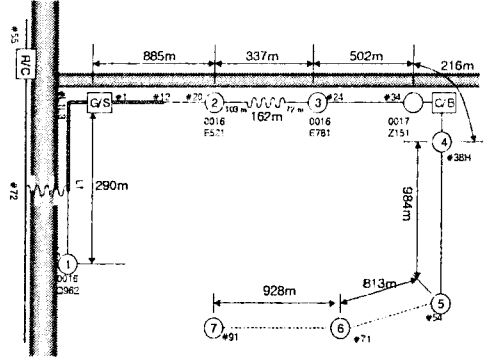


그림 3. 고압 배전선로 채널 테스트 필드(청계지선)

그림 4는 그림 3의 테스트 필드에서 실제 채널 분석을 위해 선정된 임펄스 응답 측정 구간이다. 선정된 측정 대상 구간으로부터, 2번-3번 지점간의 지중케이블의 영향, 3번-4번 지점간의 3상-단상 변화의 영향, 그리고 4번-5번 지점간의 단상 1km 구간 영향을 확인 할 수 있다.

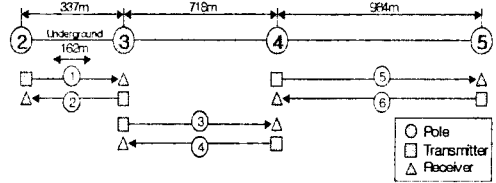


그림 4. 측정 대상 구간

#### 3.2 측정 구성

이미 언급한 바와 같이 전력선 채널 중에서도 특히 고압 배전선로에 대해서는 원거리 측정이 기본이 되므로, 임펄스 응답 측정 방법으로서 PN 시퀀스 방식이 가장 용이하다. 그림 5에서 PN 시퀀스 송신부는 PN 시퀀스 발생기로부터 나오는 20MHz의 4095chip 주기를 갖는 PN 시퀀스를 외부 신호 발생기로부터의 21MHz 반송파로 변조한 후 전력증폭기를 통해 전력선에 주입한다. 이 신호는 동축 케이블과 신호 커플러를 거쳐 고압 배전선로를 따라 수신측에 전달되며, 수신측에서는 고속 샘플링이 수행되고 GPIB 인터페이스를 통해 PC에 수집, 저장된다.

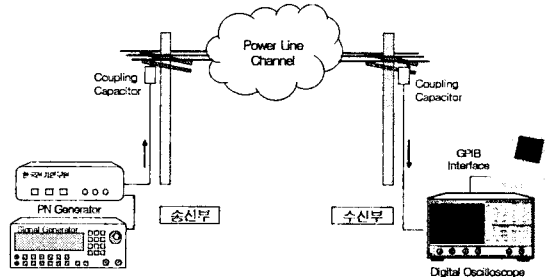


그림 5. 고압 배전선로 임펄스 응답 측정 구성

#### 3.3 임펄스 응답 파라미터

임펄스 응답 모델은 다중경로 모델로서 식 (1)과 같이 표현되며, 주요 파라미터로서 다중경로 수  $N$ , 신호 감쇄  $\alpha_n$ , 위상천이  $\theta_n$ , 초과 시간 지연  $\tau_n$ 을 포함 한다.

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \delta(t - \tau_n) e^{j\theta_n} \quad (1)$$

초과 시간 지연은 최초 신호 수신 시점부터 초과되어 수신되는 다중경로 신호들과의 시간차로서, 보다 중요하게는 식 (2)와 (3)에 나타난 평균 초과 지연  $\bar{\tau}$ 과 RMS 지연 스프레드  $\bar{\sigma}$ 가 사용된다.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{n=1}^N |\alpha_n|^2 \tau_n}{\sum_{n=1}^N |\alpha_n|^2} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad \text{단, } \bar{\tau}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N |\alpha_n|^2 \tau_n^2}{\sum_{n=1}^N |\alpha_n|^2} \quad (3)$$

### 3.4 측정 결과

그림 6은 임펄스 응답 측정 결과의 예로서 2번-3번 지점간의 크기응답과 위상응답의 결과이다. 총 50회 측정된 결과로부터 각 파라미터들의 평균을 구하며, 결과는 전력선 채널 없이 측정된 기준값에 의해 정규화하였다.

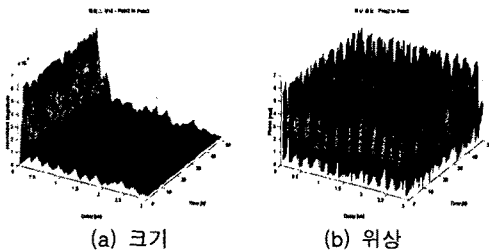


그림 6. 임펄스 응답 결과 예(2번-3번 지점 사이)

표 1. 고압 배전선로 채널 임펄스 응답 특성 파라미터

구간	$\bar{N}$ [개]	$\bar{\tau}$ [ $\mu$ s]	$\bar{\sigma}$ [ $\mu$ s]	$\bar{\alpha}_1$	$\bar{\alpha}_2$
2-3지점간 337m, 162m 지중선로 포함					
2지점→3지점	2.90	0.147	0.098	-43.35	-48.40
3지점→2지점	3.16	0.156	0.098	-46.37	-49.81
3-4지점간 718m, 3상-단상 변환 구간					
3지점→4지점	5.36	0.303	0.358	-50.33	-58.95
4지점→3지점	4.18	0.285	0.272	-50.16	-56.32
4-5지점간 984m, 순수 단상 구간					
4지점→5지점	6.14	0.305	0.255	-58.84	-63.70
5지점→4지점	6.50	0.313	0.251	-59.10	-64.32

표 1은 측정 결과로부터 얻은 파라미터 값이다. 모든 파라미터가 선로의 길이 증가에 비례하여 증가하는 경향을 보인다. 이것은 선로 길이가 증가함에 따라 자체의 신호 감쇄가 증가하고, 보다 많은 분기 및 부하를 포함하게 됨에 의한 다중경로 수가 증가하며, 경로의 증가에 의한 신호 전달 지연이 증가하기 때문이다. 그리고 지중선로의 영향은 짧은 선로길이임에도 크게 나타났다. 측정결과로부터 고압배전선로 채널은 최대 수신 경로에 대해 1km당 약 60dB 신호 감쇄가 있음을 확인하였다. 그림 7은 각 측정 대상 구간별 임펄스 응답에 대한 주파수 영역 응답, 즉 전달 함수 특성이다. 2장에서 언급한 바와 같이 5MHz 이하 35MHz 이상의 대역에서 다소 오차가 존재하며, 전체적으로 20MHz 이상의 대역에서, 보다 큰 신호 감쇄가 발생함을 알 수 있다.

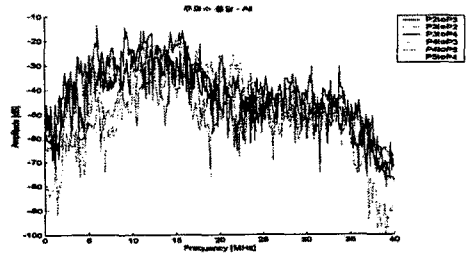


그림 7. 측정된 임펄스 응답의 주파수 응답 변환 결과

## 4. 결 론

본 논문의 2장에서는, 전력선 통신 채널의 임펄스 응답 측정 방식에 있어서 PN 시퀀스 방식을 소개하고 실제 구현에 의한 실험성 검토를 수행하였다. 3장에서는, 고압 배전선로를 이용한 액세스망이나 백본망 구성을 고려한 실제 고압배전선로 테스트 필드를 소개하고, 테스트 필드 상의 채널 임펄스 응답 측정 결과를 제시, 분석하였다. 측정 결과로부터 다양한 파라미터를 얻었으며, 이 결과는 전력선 통신망을 구성하는 전력선 통신용 모뎀, 리피터, 라우터, 전력중복기 등의 개발에 있어서 각종 시뮬레이션 및 애플레이션, 그리고 테스트 필드 상의 실증 시험의 기초 자료가 될 것이다.

향후에는 국내의 다양한 고압 배전선로 채널 환경에 대해 임펄스 응답 측정으로부터 체계적 채널 정보 수집과 분석이 이루어져야 할 것이며, 측정결과로부터 전력선 통신의 장애 요인을 분석하고 이를 극복하는 적극적인 연구 개발이 이루어져야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 오취명 외, "전력선 채널 임펄스 응답 측정에서 PN 시퀀스를 이용한 광대역 방식 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 D권, 2003
- [2] Kaveh Pahlavan and Allen H. Levesque, "Wireless Information Networks", John Wiley & Sons, 1995
- [3] Yong-Hwa Kim et al., "Wideband Channel Measurements and Modeling for In-House Power Line Communication", ISPLC2002, March, 2002
- [4] Hui-Myoung Oh et al., "Wideband Channel Impulse Response Measurement Method Using PN Sequences For The Medium Voltage Power Distribution Line Channel", ISPLC2004, April, 2004
- [5] D. Tholl, et al., "A Comparison of Two Radio Propagation Channel Impulse Response Determination Techniques", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 41, No. 4, April, 1993