

비접촉식 유도성 결합기를 이용한 다중경로 전력선 채널 특성

김현식¹ · 손경락[†]

(Received August 24, 2016 ; Revised October 26, 2016 ; Accepted November 14, 2016)

Channel characteristics of multi-path power line using a contactless inductive coupling unit

Hyun-Sik Kim¹ · Kyung-Rak Sohn[†]

요약: 광대역 전력선 통신은 전류의 흐름과 함께 효과적인 양방향 통신을 얻기 위하여 전력선 분배망을 통신 매체로 이용한다. 그러나 전력선은 통신에 최적화된 채널이 아니므로 인터넷, 음성 및 데이터 서비스에 대한 통신 시스템의 개발은 시뮬레이션에 의한 성능 분석에 적합한 측정 기반의 전송 모델을 필요로 한다. 본 논문에서는 복잡한 전달 함수를 기술하는 분석 모델을 다중 전력선 모델의 감쇠 및 경로 파라미터를 획득하는데 이용하였으며 이를 바탕으로 주파수 응답특성을 계산하였다. 계산된 결과는 다중경로에 의한 주파수 선택성 페이딩과 주파수에 대한 신호의 감쇄를 보여주었으며 이는 실험 결과와 잘 일치하였다. 이론모델에 적용한 배전선을 실험적으로 구성한 후 배전선에 전기적인 신호를 인가하는 방법으로 비접촉식 결합을 위한 페라이트 코어로 구성된 유도 결합 장치를 사용하였다. 신호 결합 손실은 커플러에 감긴 권선수에 의해 최소화 될 수 있다. 3회 권선 결합 효율은 일회 권선 결과보다 6dB 이상 개선됨을 보였다.

주제어: 전력선 통신, 유도성 결합기, 전달함수, 다중경로 배전선 모델, 페라이트 코어

Abstract: Broadband powerline communication (BPLC) uses distribution lines as a medium for achieving effective bidirectional data communication along with electric current flow. As the material characteristics of power lines are not good at the communication channel, the development of power line communication (PLC) systems for internet, voice, and data services requires measurement-based models of the transfer characteristics of the network suitable for performance analysis by simulation. In this paper, an analytic model describing a complex transfer function is presented to obtain the attenuation and path parameters for a multipath power line model. The calculated results demonstrated frequency-selective fading in multipath channels and signal attenuation with frequency, and were in good agreement with the experimental results. Inductive coupling units are used as couplers for coupling the signal to the power line to avoid physical connections to the distribution line. The inductance of the ferrite core, which depends on the frequency, determines the cut-off frequency of the inductive coupler. Coupling loss can be minimized by increasing the number of windings around the coupler. Coupling efficiency was improved by more than 6 dB with three windings compared to the results obtained with one winding.

Keywords: Power line communication, Inductive coupling unit, Transfer function, Multi-path distribution line model, Ferrite core

1. 서론

유도성 결합기 (Inductive coupling unit: ICU)는 광대역 주파수 영역의 통신신호를 배전선에 결합시킬 수 있는 장치로 전력선통신 시스템에서는 핵심소자이므로 교류전압 600V 이하의 저압은 물론 600V 초과 고압의 전력선에서도 물리적인 접촉점 필요 없이 단순한 체결만으로 신호를 결합할 수 있어서 다양한 응용에 활용되고 있다. 유도성 결합기의 기본적인 구조는 일본 미쓰비시 전기에서 공극을 가지는 마그네틱 코어를 이용할 수 있음을 최초로 제안하였

고 300A의 전류가 흐르는 배전선에서 결합효율을 실험하여 9MHz 주파수에서 삽입손실이 6 dB 임을 보고하였다[1]. 국내의 경우에도 나노 결정립 재료를 이용한 비접촉식 결합기를 설계하고 그 특성을 발표하였다[2].

유도성 신호결합기가 2-30MHz의 주파수 범위에서 통신 신호를 전력선으로 실어 보내고 다시 신호를 분리해 낼 수 있는 방법이 개발되면서 고속전력선 통신에 대한 다양한 응용 연구가 진행되었다. 최근에는 열차 내 무배선 통신시스템을 구축하기 위하여 유도성 결합기가 적용된 통신연결

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8888-1241>): Major of Electronics and Communications Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: krsohn@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4312
1 Matttron Corporation, E-mail: hskim@matttron.kr, Tel: 055-232-5941

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

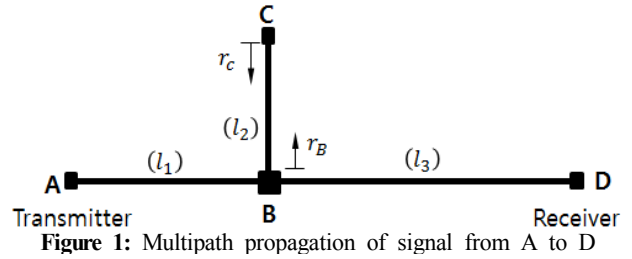
장치가 개발되었다[3]. 선박의 경우 브리지에서 선박의 다양한 정보를 수집하는 방법으로 기존의 통신전용선을 이용하는 방법과 더불어 신규선로 가설없이도 선박 내부의 전력선, 전화선, 또는 스피커선 등으로 통신할 수 있는 방법이 발표되었다[4]. 유도성 결합기의 가장 큰 장점중 하나는 기존의 배선구조를 변경하거나 전선을 훼손할 필요가 없기 때문에 도체가 설치된 곳이라면 어느 곳이든 적용 가능하다는 것이다. 풍력발전기의 경우 상단 나셀부와 하단 전력 제어부간 고압 전력선으로 연결되어 있으므로 유도성 결합기를 이용한 전력선 통신에서 Mbps급 통신이 가능함을 실험적으로 검증하기도 하였다[5][6].

유도성 결합기가 전력선 인프라 기반 통신 또는 전력선을 포함하고 있는 이동체의 내부 통신에 확대 적용될 수 있는 잠재력을 가지고 있음에도 불구하고 다중경로를 포함하는 배전선에서 동작 특성을 분석한 연구결과를 찾아보기는 쉽지 않다. 본 연구에서는 다중경로 전력선 채널 모델로부터 채널의 주파수 응답특성을 결정하는 감쇠 파라미터와 경로 파라미터를 구하여 유도성 결합기가 다중 경로 배전선에서 보이는 주파수 응답 특성과 신호결합특성을 비교하고자 한다. 또한 결합기에 감기는 배전선의 권선 수에 의한 인덕턴스 변화가 신호 결합효율에 미치는 영향을 분석하여 최적의 조건을 도출하고자 한다.

2. 전력선 채널 모델

전력선 로컬 근거리 망은 변전소와 고객의 가옥 간 연결이 점대점이 아니라 분배망 케이블, 분배망 케이블간 연결, 각 가정을 연결한 케이블 등으로 구성되어 있다. 그러므로 전력선 통신에서 데이터 신호의 전송은 단일경로를 따라 전달되는 것이 아니라 무선통신과 유사하게 다중경로를 따라간다. 반사파에 의한 추가적인 경로를 포함해야 하므로 선택적인 주파수 페이딩을 고려하여야 한다.

Figure 1은 전력선의 다중경로 신호 전송을 반영한 주파수 응답특성을 보기 위한 전달함수를 유도하기 위한 간략한 모델이다[7]. l_1, l_2, l_3 의 길이를 가지는 세 개의 선로가 한 개의 분기점에서 연결된 구조를 가지며 각각의 특성 임피던스는 Z_1, Z_2, Z_3 이다. 간략화를 위하여 A와 D는 매칭되어 있다고 가정하면 $Z_A = Z_1$ 이며 $Z_D = Z_3$ 라고 둘 수 있다. 이러한 가정은 B와 C에서 발생하는 반사계수 r_B 와 r_C 를 고려하면 다중 반사에 의한 무한 경로가 가능해진다. 즉, $A \rightarrow B \rightarrow D$, $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$, $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$, $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$ 등의 경로가 발생한다. 투과계수와 반사계수를 고려한 i 번째 경로의 가중치를 g_i 라 한다. 이때 g_i 는 투과계수와 반사계수의 곱으로 1 이하의 값을 가진다. 신호가 경로를 따라 반사와 투과를 많이 경험할수록 가중치 g_i 는 점점 더 작아진다. 즉, 경로가 길어질수록 신호감쇠는 크게 일어나므로 수신단측에서 통합된 전체신호에 미치는 영향도 미미하게 될 것이다.



전력선 손실은 신호감쇠로 나타나며 이는 주파수와 경로의 길이에 의존하는 함수로 주어진다. 각각의 개별적인 경로를 통해 수신단에 도달한 신호는 중첩의 원리에 의해 모두 더해지므로 A 지점에서 D 지점간 주파수 응답특성은 식 (1)로 주어진다[8].

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i A(f, l_i) e^{-j(2\pi l_i/v_p)f} \quad (1)$$

여기서 g_i 는 경로 가중치, v_p 는 전력선 위상속도이며 $v_p = l_i/\tau_i$ 로 주어진다. τ_i 는 경로차에 의한 시간지연이다. 전송되는 신호는 거리가 멀어지고 주파수가 올라가면 감쇠의 영향을 받는다. 식 (1)로 주어진 주파수 응답특성 $H(f)$ 는 케이블의 매개변수, R, L, G, C 에 의존하는 복소 전파상수 $\gamma = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} = \alpha + j\beta$ 와 임의의 거리 x 에서의 선로전압 $V(x)$ 를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$H(f) = \frac{V(x=l_i)}{V(x=0)} = e^{-\gamma l_i} = e^{-\alpha(f) l_i} e^{-j\beta(f) l_i} \quad (2)$$

케이블 매개변수인 C 와 L 은 기하학적인 치수와 재료의 특성으로부터 추정할 수 있다. MHz 주파수 영역에서 단위 길이 당 저항 R 은 표피효과에 의해 지배되어지므로 \sqrt{f} 에 의존한다. 단위 길이당 컨덕턴스 G 는 유전물질의 소산계수의 영향을 받으므로 주파수 f 에 비례한다. 일반적인 구조와 재료의 특성에서는 관심영역 주파수에서 $R \ll \omega L$ 이고 $G \ll \omega C$ 이다. 케이블을 실질적인 임피던스 Z_L 을 가지는 약손실로 가정하면 복소전파상수는 식 (3)과 같이 간략화할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{2} \frac{R}{Z_L} + \frac{1}{2} G Z_L + j\omega \sqrt{LC} \\ &= k_1 \sqrt{f} + k_2 f + jk_3 f \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 전파상수의 실수부분은 감쇠계수 α 를 의미하며, 주파수가 증가하면 같이 증가한다. 수직적인 유도와 광범위한 주파수 응답 측정 결과에 기인한 감쇠상수 α 의 근사식은 식 (4)와 같다.

$$\alpha(f) = a_0 + a_1 f^k \quad (4)$$

여기서 a_0 와 a_1 은 감쇠 매개변수로 측정된 전달함수로부터 유도하며, k 는 감쇠상수의 멱지수로 통상 0.5~1의 값을 가진다.

식 (2)와 (4)를 이용하면 전력선의 신호감쇠를 식 (5)로 나타내어진다.

$$A(f, l_i) = e^{-\alpha(f)l_i} = e^{-(a_0+a_1f^k)l_i} \quad (5)$$

식 (1)의 전력선 모델을 본 연구에서 사용한 전력선에 적용하여 시뮬레이션 한 결과를 측정값과 비교하여 관련 파라미터 값을 구하였다. 본 연구에서는 0.6/1KV 비닐절연 비닐캡타이어 2심 케이블 중 최대 도체 저항이 13.3 Ω/km, 공칭 단면적 1.5 mm²인 전선을 이용하였으며 도선의 길이는 각각 $l_1 = 20m$, $l_2 = 10m$, $l_3 = 30m$ 이다. 네트워크 분석기로 측정된 감쇠 특성과 이에 대응하는 위상변화를 Figure 2에 제시하였으며 식 (1)을 이용한 계산결과와 비교하였다. 각 선로의 열린 탭에서의 반사는 Figure 2 (a)와 같이 주기적인 골의 형태로 나타나고 있으며 이에 상응하는 주파수에 대한 위상 변화는 Figure 2 (b)에서 확인할 수 있다. 이로부터 4개의 다중경로를 고려한 전력선 모델의 감쇠와 경로 파라미터를 구한 결과는 Table 1과 같다.

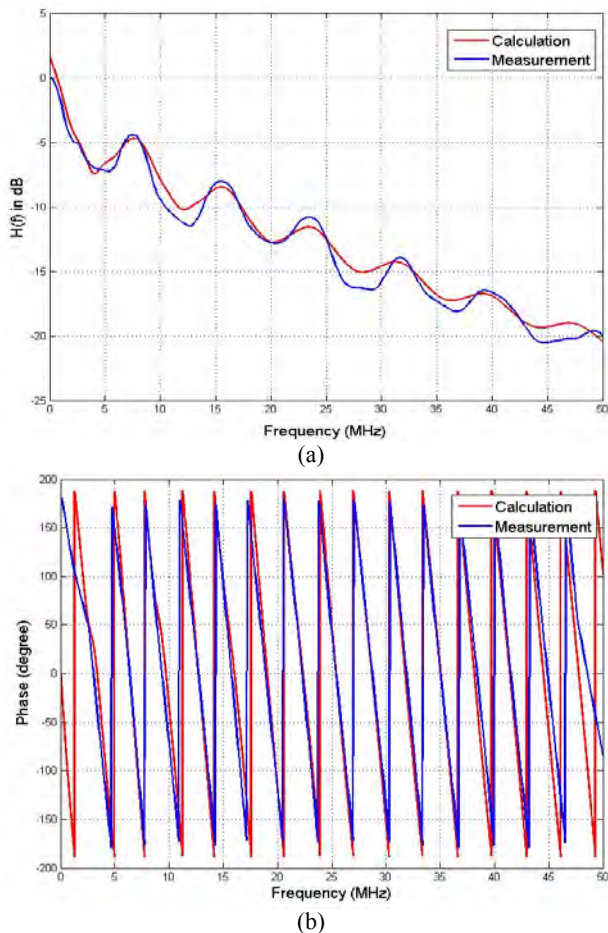


Figure 2: Measurement and simulation results for N = 4 powerline link. (a) attenuation profile, (b) phase

Table 1: Parameters of the four path model

attenuation parameters					
$k = 0.7$	$a_0 = 2.5 \times 10^{-3} s/m$	$a_1 = 3.5 \times 10^{-7} s/m$			
path parameters					
i	g_i	d_i/m	i	g_i	d_i/m
1	0.6	50	3	0.15	90
2	0.4	70	4	0.1	110

3. 유도성 신호결합기

유도성 신호결합기(inductive coupling unit: ICU)는 광대역 전력선 통신에서 배전선으로 신호 전류를 유도할 수 있는 소자이다. 개략적인 구조와 실물 사진은 Figure 3에서 볼 수 있다. 구조적으로 공극을 가지는 페라이트 코어, 전력선통신 모델과 연결하기 위한 단자, 페라이트 코어를 일주하며 감긴 전선으로 구성되어 있다. 코어 중심은 배전선이 지나갈 수 있게 원형으로 뚫려있다.

배전선과 페라이트 코어에 감긴 권선사이의 상호 인덕턴스를 이용하면 고주파 신호를 배전선으로 결합시킬 수 있다. 배전선에 흐르는 전류로 인해 페라이트 코어에 축적되는 자기에너지는 $W = V_{fc} \cdot \int_0^B HdB$ 이고 이때 요구되는

인덕턴스가 L이라면 $W = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}V_{fc} \frac{B^2}{\mu}$ 가 된다. 여기서 B, V_{fc} , μ 는 각각 페라이트 코어의 자속밀도, 체적, 그리고 투자율이다. 배전선에 흐르는 전류의 크기에 따라 페라이트 코어의 크기와 재료의 종류가 결정됨을 보여준다. 본 연구에서는 고주파 특성을 향상시키기 위하여 Mg와 Zn이 첨가된 산화물계 자심재료를 사용한 페라이트 코어 기반의 유도성 결합기를 사용하였다.

제작된 결합기의 투자율을 얻기 위해서는 인덕턴스를 측정하여 수식 $\mu = \frac{L \times l}{N^2 \times A}$ 으로부터 계산해낸다. 여기서 l은 코어의 유효원주, A는 코어 단면적, N은 권선수이다. Figure 4 (a)는 주파수 함수로 측정된 자기인덕턴스(self-inductance) 특성을 보여준다. 10 MHz까지 0.3 uH로 거의 일정한 인덕턴스 값을 보인 후 30 MHz까지는 서서히 증가하고 있다. 30 MHz 부근에서는 0.4 uH로 최대치를 보이지만 이후 주파수에서 급격히 감소하여 35 MHz 이상에서는 더 이상 유도성 결합기의 특성을 유지하지 못하고 용량성으로 되어 인덕턴스로서의 기능을 상실한다. 이는 유도성 결합기의 대역폭을 제한하는 요인이다. 또한 Figure 4 (b)와 같이 자기공진주파수에서 임피던스가 올라가게 되는 결과를 보여준다. 저기공진주파수에서는 순수저항성분만 나타나며 180 Ω의 최대 임피던스를 보인다.

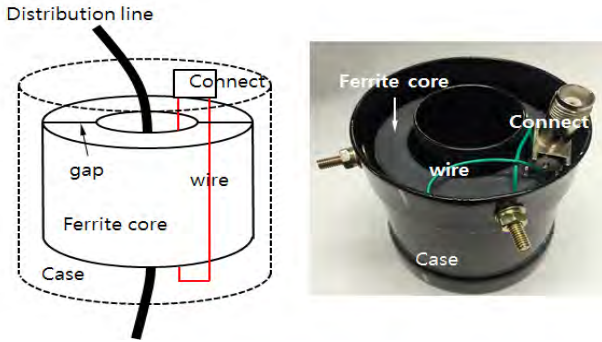


Figure 3: Structure of inductive coupling unit

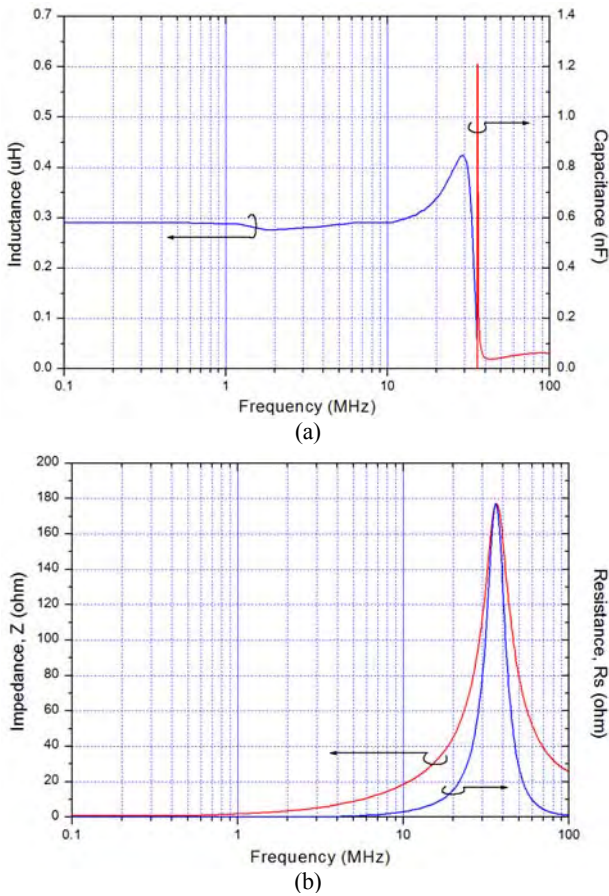


Figure 4: Frequency characteristics of ICU. (a) inductance and (b) impedance

Figure 5는 배전선과 페라이트 코어 권선사이의 상호 인덕턴스 (mutual inductance)에 의한 신호결합효율을 측정하기 위한 실험구성도이다. 네트워크 분석기와 결합케이블 (coupling cable)을 이용하여 유도형 결합기의 주파수 응답 특성을 볼 수 있는 S_{21} 을 측정하였다. 결합케이블은 페루프를 형성하도록 동선을 이용하여 제작하였으며, 여기에 코어의 자기에너지에 의해 전류가 유도된다.

Figure 6는 결합케이블의 권선수에 따라 측정한 결합효율을 보여준다. 1회 권선에서는 측정 주파수 영역에서 결합손실이 -5dB 이하로 측정되었지만 2회 권선에서는 10MHz 까지 -3 dB 이하로 결합손실이 유지된다. 3-4회 권선에서는

3MHz 까지 -2.5 dB이하로 결합손실이 개선되지만 이 후 주파수에서는 2회 권선보다 약간 떨어지는 손실특성을 보인다. 그러나 권선수가 5회 이상이 되면 결합효율이 지속적으로 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그러므로 결합케이블의 권선수는 2-4회가 적절하며 이때 -3 dB 대역폭은 25 MHz 주파수에서 형성되고 있다. 30 MHz 주파수영역에서는 자기공진주파수로 인하여 노치필터 특성을 보인다.

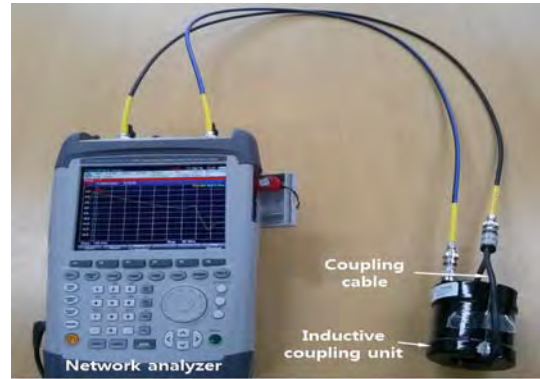


Figure 5: Experimental setup for measuring the ICU's coupling

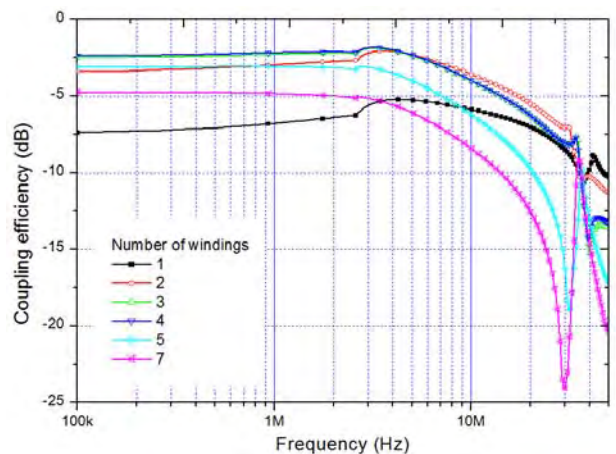


Figure 6: Measured coupling efficiency in terms of number of turns

4. 배전선과 유도성 결합기간 신호결합특성

Figure 1의 다중경로 배전선 모델에 유도성 결합기의 신호결합 특성을 측정하기 위한 실험 구성도는 Figure 7과 같다. B 지점과 50Ω 종단저항 사이에 위치한 30 m 길이 배전선의 28m 위치에 유도성 결합기를 체결한 후 신호결합 특성을 측정하였다. A 지점의 신호발생기에서 5 Vpp (peak-to-peak voltage) 크기를 가지는 정현파 신호를 배전선에 입사하여 유도성 결합기에서 결합된 신호를 스펙트럼 분석기와 디지털 오실로스코프로 측정하였다.

Figure 8은 배전선으로 전송되는 신호에 대한 유도성 결합기의 주파수 응답특성을 스펙트럼 분석기로 측정한 결과이다. Figure 6의 결과를 기초로 결합기에 감는 전선의 회수를 1회와 3회로 하여 측정하였다. 두 경우에 대한 전체적인 결합손실 그

래프의 경향성은 유사하지만 3회 권선에서 결합효율이 가장 높은 2MHz에서 6 dB 이상 개선되었다. 그러나 3회를 초과하면 자심재료의 인덕턴스 변화가 오히려 결합기의 삽입손실을 증가시켜 신호결합효율을 더 이상 개선시키지 못하였다.

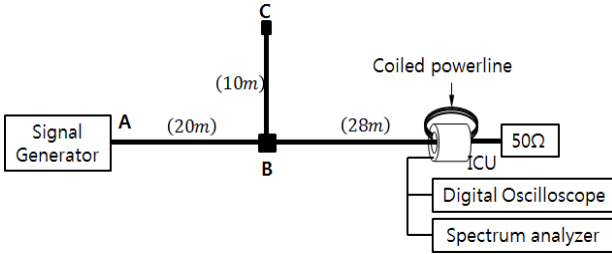


Figure 7: Experimental setup to measure the coupling efficiency between the ICU and distribution lines

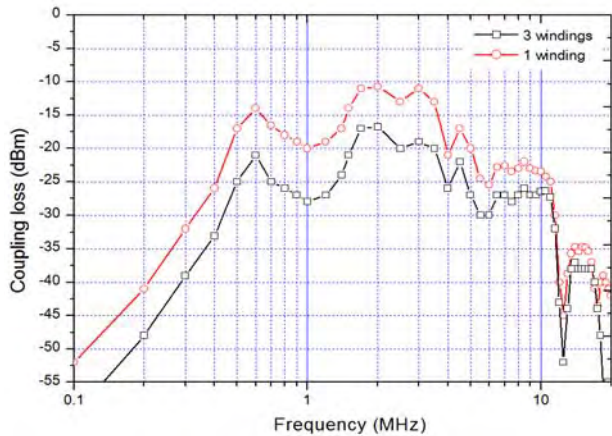


Figure 8: Frequency response against number of winding

Figure 9는 Figure 8의 결과에서 결합손실이 가장 낮은 2MHz 정현파 신호에 대하여 오실로스코프로 측정된 출력파형이다. 결합된 신호 전압을 측정된 결과 1회 권선에 비하여 3회 권선에서 3배 정도 더 큰 전압이 유도됨을 보여준다. 이러한 결과는 배전선의 길이 또는 선로 저항 등으로 추가 선로 손실이 발생하여 전력선 통신 가능 거리가 문제가 될 경우 결합기 권선의 회수를 이용하여 개선할 수 있음을 보여준다.

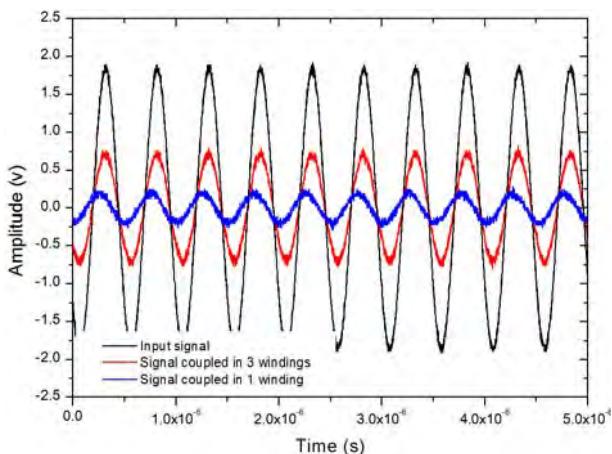


Figure 9: Time domain response for 2 MHz sinusoidal wave

5. 결 론

본 연구에서는 분기와 임피던스 부정합을 고려한 다중경로 모델기반 전달함수에 실측기반 주파수 응답특성을 적용하여 감쇠파라미터와 경로 파라미터를 찾았다. 전달함수에 의한 계산결과와 측정결과가 잘 일치하였으며, 배전선의 중간탭에 의한 다중경로 주파수 페이딩과 신호 주파수의 감쇠 특성이 나타남을 확인하였다. 배전선에 신호결합 및 추출을 위해 전력선 통신에서는 접촉식 또는 비접촉식 결합기를 사용한다. 접촉식을 사용할 경우 이론 모델과 다른 추가적인 경로가 발생하므로, 배전선 모델에 물리적인 접촉을 회피하여 할 수 있는 비접촉식 유도성 신호 결합기 사용하여 전력선 통신에서 일어나는 신호결합 특성을 조사하였다. 페라이트 코어에 의한 임피던스 특성으로 자기공진 주파수가 30 MHz 주파수 영역에서 나타났으며 이는 통신 대역폭을 제한하는 요소임을 밝혔다. 배전선의 권선수에 의한 결합효율을 측정된 결과 3-4회 권선에서 최소 결합손실을 보였다. 이를 기반으로 배전선 모델에 3회 권선을 적용하여 2MHz 신호대역에서 1회 권선 대비 6 dB 이상 높은 신호결합효율을 얻었으며, 전송채널의 추가 손실로 발생하는 신호결합효율의 저하를 보상할 수 있는 방안으로 활용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단 산학협력선도대학 육성사업 및 국민편익증진기술개발사업의 지원으로 수행된 연구결과물입니다.

References

- [1] Y. Murata and T. Kimura, "Inductive coupling unit and bypass tool for power line communications," *Advance*, vol. 109, pp. 18-20, 2005.
- [2] J. R. Kim, H. S. Kim, J. S. Huh, H. Y. Lee, J. H. Lee, Y. W. Oh, and W. B. Byun, "The design and characteristics of the inductive coupler using the Nanocrystalline materials," *Journal of the Korean Magnetics Society*, vol. 16, no. 6, pp. 300-304, 2006 (in Korean).
- [3] H. S. Kim, S. H. Park, and S. G. Kang, "Development of communication joint tools for implementing a legacy-line communication system in a train," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 877-887, 2015 (in Korean).
- [4] H. I. Jun, H. S. Kim, K. S. Jung, and K. R. Sohn, "Development of bypass unit for ship area network based on legacy-line communication," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 3

pp. 292-297, 2015 (in Korean).

- [5] K. R. Sohn, K. H. Kim, S. U. Jeong, S. Y. Nam, and H. S. Kim, "Performance analysis of the power-line communication for condition monitoring system of an MW class offshore wind turbine's nacelle," *Journal of Navigation and Port Research*, vol. 40, no. 3, pp. 159-164, 2016 (in Korean).
- [6] K. H. Kim, S. U. Jeong, S. Y. Nam, H. S. Kim, and K. R. Sohn, "Performance analysis of legacy line communication using high current powerlines in mid-range wind turbines," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 4 pp. 336-341, 2016 (in Korean).
- [7] P. Mlynek, M. Koutny, and J. Misurec, "Multipath channel model of power lines," *Elektrorevue*, vol. 1, no. 2, pp. 48-53, 2010.
- [8] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 40, pp. 553-559, 2002.