Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 40, No. 4 pp. 336~341, 2016
J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME)
http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2016.40.4.336

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
**Original Paper**

# 중형급 풍력 발전기내 전력선을 이용한 무배선 통신 성능분석

김경화[1] · 정성욱[2] · 남승윤[3] · 김현식[4] · 손경락†

(Received December 14, 2015 ; Revised April 5, 2016 ; Accepted April 17, 2016)

# Performance analysis of legacy line communication using high current powerlines in midrange wind turbines

Kyoung-Hwa Kim[1] · Seong-Uk Jeong[2] · Seung-Yun Nam[3] · Hyun-Sik Kim[4] · Kyung-Rak Sohn†

**요약:** 본 논문에서는 풍력 발전기 내 기 설치된 전력선을 통신 선로로 사용하여 통신 네트워크를 구축하는 기술인 무배선 감시 시스템을 제안한다. 전력선과 데이터통신 기기의 연결을 위하여 발전기의 다양한 전류 및 전압 변화에서도 안정적인 통신이 가능한 유도성 결합장치와 복합통신장치를 사용하였다. 실제 운영되고 있는 풍력 발전기를 대상으로 선로 특성분석을 통해 전력선 통신의 구축 가능성을 확인 후 영상 전송 시스템을 구현하였다. 구현된 전력선 통신 시스템은 43Mbps 이상의 전송속도를 제공하고, 통신 성공률은 100%로 실시간 비디오 영상 전송이 가능함을 확인했다. 따라서 제시된 시스템은 통신 선로의 추가 설치 없이도 풍력 발전기에 통신 네트워크 구축이 가능하며, 전력선 통신 네트워크 기반의 실시간 감시 시스템을 도입하는 경우 매우 효과적일 것으로 기대된다.

**주제어:** 전력선 통신, 신호결합장치, 풍력발전기 감시 시스템, 전력선통신 모뎀

**Abstract:** This paper presents an implementation of a communication network in wind turbines, which exploits the power-line communication system (PLC). We used an inductive coupling unit and a multi-interface device to connect a data-communication terminal to the power line, to ensure that stable communication was possible at various electric current and voltage values of the generator. The results of the operation tests conducted on an operational wind turbine showed that the implemented PLC demonstrated a transmission rate of at least 43 Mbps with a 100% success rate. Moreover, a real-time image was transmitted. Thus, the system could be a useful alternative for implementing a communication network in wind turbines that does not require additional channels. Since the presented system is easy to implement, and can support various interfaces for data communication, it will be quite useful when a real-time monitoring system is launched in wind turbines.

**Keywords:** Power Line Communication, signal coupling unit, wind-turbine monitoring system, PLC modem

## 1. 서 론

화석에너지의 고갈과 환경 문제 등으로 안전하고 지속가능한 새로운 에너지원의 개발에 대한 관심이 전 세계적으로 확대되고 있다. 풍력에너지는 상대적으로 낮은 비용으로 전기에너지를 얻을 수 있기 때문에 현실적인 대체 에너지원으로 평가되며, 꾸준한 성장률을 보이고 있다**[1]-[3]**.

풍력 에너지를 생산하기 위한 풍력발전은 에너지 효율 증대 및 비용 절감을 위해 풍력 터빈의 대형화 및 해상 풍력단지로 조성되는 추세이다**[4]**. 풍력발전기의 대형화로 타워 높이와 블레이드 길이 증가에 따른 풍력터빈의 구성 요소들이 견디어야 할 기계적, 전기적 허용 용량 또한 증가하고 있으며, 이에 따른 기계 결함 및 사고 위험성도 높아지고 있다. 특히, 화재 사고는 블레이드 제어 상실로 타워 파손이 가능하고, 대부분의 화재 발생은 막대한 경제적 손실로 이어진다. 또한, 해상풍력발전은 고장발생 시 풍속과 파고에 따른 풍력발전기 접근에 제약이 있기 때문에 사고 예방과 관리를 위해 감시 시스템 개발을 위한 통신 네트워크 구축이 필요하다**[5][6]**.

풍력발전의 핵심 운영 기술로 원방감시제어(Supervisory

† 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 Major of Electronics and Communications Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: kim_kh@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4939
2 Mattron Corporation, E-mail: sujeong@mattron.kr, Tel: 055-232-5941
3 Mattron Corporation, E-mail: synam@mattron.kr, Tel: 055-232-5941
4 Mattron Corporation, E-mail: hskim@mattron.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.

**Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering**

Control and Data Acquisition, SCADA)가 있으나 SCADA 시스템은 풍력단지의 전반적인 운영에 초점을 맞추어 개발되었기 때문에 감시 시스템으로 사용이 어렵다**[7][8]**. 또한, 기존 통신 네트워크 기반의 감시 시스템은 통신 거리의 제약, 신호 처리를 위한 추가 장비가 필요하므로 통신 네트워크 구축 시간과 비용이 과다하게 소요되며, 대형화 및 대단지 추세의 풍력발전 시스템에 부적합하다.

따라서 본 논문에서는 기존에 설치되어 있는 전력선을 통신 선로로 사용하여 통신 네트워크를 구축하는 기술인 전력선 통신(Power Line Communication, PLC) 네트워크 기반의 감시 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 이미 설치된 전력선을 통신자원으로 활용하므로 이미 운용중인 풍력 발전 시스템에도 적용이 가능하며, 대단위 해상 풍력과 같은 특수 환경에서 보다 효과적이고 효율적인 접근이 가능하다.

## 2. 풍력발전기 전력선 통신 시스템

전력선 통신시스템은 선박, 철도, 건축물 등의 시설물에 이미 설치된 전력선을 통신 매체로 사용하는 방식이다. 전력을 공급하는 전력선에 kHz 또는 MHz 대역의 고주파 신호를 실어 통신하므로 서로 다른 주파수대를 이용하기 때문에 상호 충돌 없이 전송 가능하다. 별도의 통신선 설치 없이, 기존 전력선망을 통신선로로 활용함으로써 시설물의 외형을 거의 손상시키지 않으면서도 데이터 통신을 위한 선로를 확보할 수 있는 기술이다**[9][10]**. 따라서 추가적인 통신선로의 설계와 구축에 필요한 시간과 비용 그리고 시설물의 구조 변경을 크게 줄일 수 있는 장점을 가진다. 스마트 그리드(Smart Grid)의 양방향 원격검침(AMI : Advanced Metering Infrastructure) 또는 홈 네트워크 분야에 주로 응용되고 있다**[11]**.

풍력발전기 내 감시 시스템 설치를 위한 통신 네트워크 구성은 **Figure 1**과 같다. 기존의 통신 네트워크는 **Figure 1 (a)**와 같이 별도의 통신 선로가 필요하다. 주로 사용되는 UTP 케이블의 경우 최대 허용 통신 거리가 100 m로 대형화 추세에 맞지 않고, 광섬유 케이블은 기존 설비에 적용이 어렵고 구축비용이 높은 단점을 가지고 있다. 또한, 기존에 구축된 풍력발전기 타워의 경우 내부에 새로운 기기나 장비 설치 시 별도로 제어 및 통신망을 구축해야 되며, 기존 망을 사용하지 못하기 때문에 설치 및 운용에 어려움을 겪고 있다. 따라서 **Figure 1 (b)**와 같이 기 설치된 전력선을 통신 선로로 사용하는 전력선 통신 네트워크 구축이 유리하다. 열화상 카메라와 네트워크 카메라 등과 같은 화상감시 시스템을 위해 전력선을 전용 통신선 개념으로 이용하면 네트워크 구축이 가능하다. 새로운 선로의 설치가 필요없기 때문에 기존 방식에 비해 설치, 유지 등 보다 효율적인 접근이 가능하고, 경제적이다.

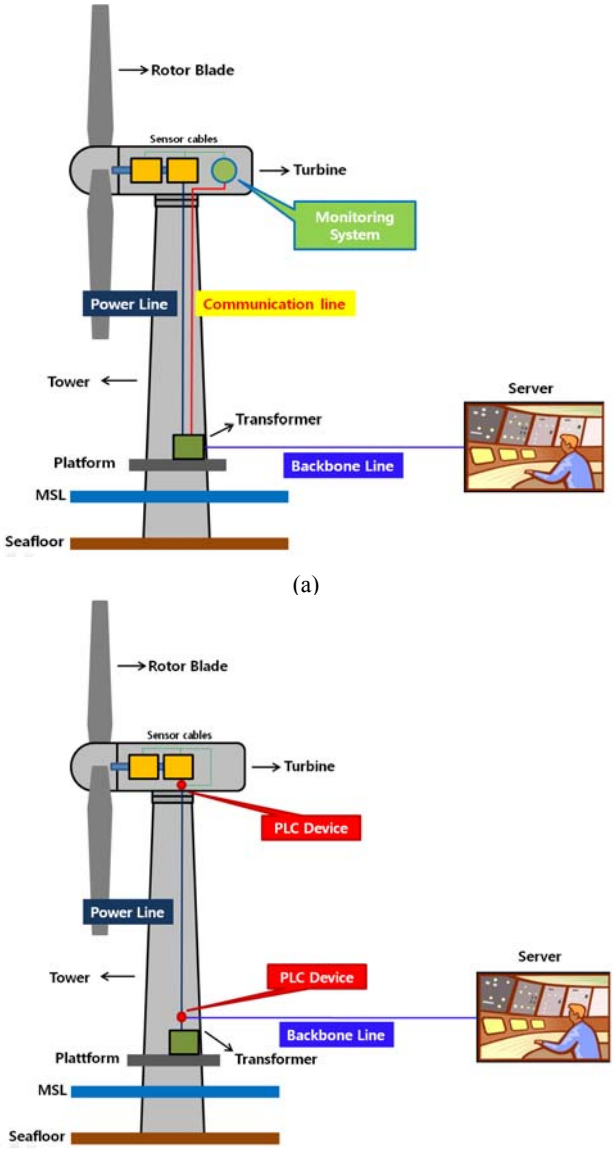



**Figure 1:** Communication network configuration in the wind turbine using (a) additional communication line and (b) existing power cable

### 2.1 신호결합장치

전력선 통신을 이용하여 풍력발전기 내에 데이터 통신네트워크를 구축하기 위해서는 기존 선로에 연결되어 변조된 통신신호를 송수신할 수 있는 통신 연결 장치가 필요하다. 통신을 위한 결합 장치로는 전도성 결합 장치와 유도성 결합장치가 있다. 전자는 선로의 동선과 물리적으로 직접 연결되는 방식으로 접촉식 장치라고 한다. 후자는 기존 도체 선로와 직접 접촉하지 않고 전자기 유도 현상을 이용하여 비접촉식으로 신호를 송수신한다. 따라서 기존 선로의 고유한 형태를 손상시키지 않으므로 설치와 운용이 용이하다. **Figure 2**와 같이 링형 구조를 가지며 통신선로가 링 내부를 관통하도록 설치된다. 여기서 IR (inner radius)와 OR

(outer radius)는 결합장치의 내반경과 외반경을 각각 나타내고, H는 높이이다. le와 Ae는 결합장치로 사용되는 자심재료에서 자로의 길이와 단면적을 각각 나타낸다. 이러한 파라미터들은 다음에 나타낸 투자율 μ을 결정하는 주요 변수로 사용된다**[9][10]**.

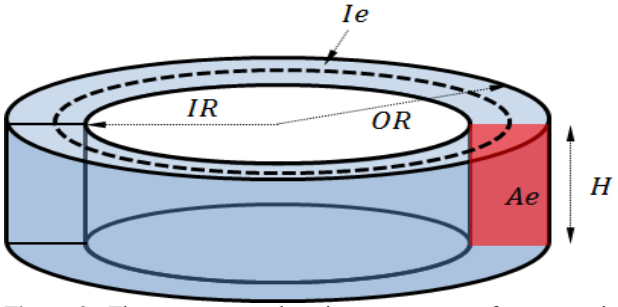



**Figure 2:** The structure and major parameters of a magnetic core material for an inductive coupling unit

$$\mu = \frac{10^9 \times L \times l_e}{4\pi N^2 A_e} \quad (1)$$

여기서 $L$은 인덕턴스이고 $N$은 인덕터의 권선 수이다. 일반적으로 전도성 결합장치는 통신 선로에 직접 연결되므로 전송 특성은 우수하나 선로피복의 절개가 요구되므로 피복의 파괴가 불가피한 경우가 있다. 이 경우 외부에 노출된 선로는 습기로 인하여 도선이 부식될 수 있으며, 이는 통신 성능의 저하나 통신 불능을 초래하는 원인이 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 **Figure 3**과 같이 부식의 위험이 적고 풍력발전기의 다양한 전류 및 전압 변화에서도 안정적인 통신이 가능한 유도성 결합장치를 사용하였다. 자심재료는 페라이트로, 투자율 및 전손 손실 등을 고려해 **Table 1**과 같이 설계되었다.

(a) (b)

**Figure 3:** (a) Ferrite magnetic material for an inductive coupling unit, (b) fabricated inductive coupling unit

**Table 1:** Major specifications of the inductive coupling unit for the legacy line communication in the wind turbine

| Dimension | 74x34x80 ($mm^3$) |
|---|---|
| Loss ($S_{21}$) | -5±2 dB |
| Frequency | 1.7～30 MHz |
| Maximum current | 300 A |
| Operating temperature | -40～+80 ℃ |

### 2.2 전력선 모뎀장치

인터페이스장치는 결합장치와 통신 단말기를 연결하여 통신과 간단한 형태의 신호변환 기능을 수행한다. **Figure 4**는 RS-232 등과 같은 직렬통신 기능을 갖춘 측정기기, 센서, 디스플레이 기기를 풍력 발전기 내 전력선 통신 네트워크에 접속하기 위한 이더넷 통신 프로토콜 변환 기능을 갖춘 전력선 모뎀장치이다. 무선 개인통신망(wireless personal area network: WPAN) 표준을 이용한 감시 모니터링 시스템을 위한 소규모 센서 네트워크 구축을 고려하면 이더넷통신 뿐만 아니라 직렬통신 등 제한된 범위 내에서 더욱 다양한 통신 기능이 인터페이스장치에 필요하며 복합모뎀의 기능을 수행할 수 있게 설계되어져 있다**[9][10]**. 본 연구에서 개발한 전력선 모뎀의 사양은 **Table 2**와 같다.

**Figure 4:** Prototype of multi-interface PLC modem

**Table 2:** The target specifications of a multi-interface device

| Maximum data rate | 200 Mbps |
|---|---|
| Power dissipation | 4.7 W |
| Frequency range | 2～30 MHz |
| Interface | PLC, RJ45, RS-232, TNC, 3.3V TTL |

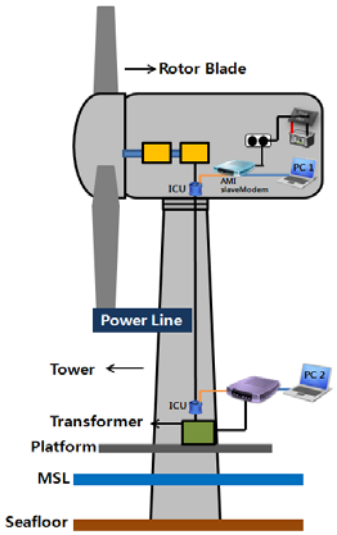
## 3. 시스템 구현 및 실험

풍력 발전기에서의 전력선 통신 네트워크 구성을 위하여, 목포대에서 실제 운영되고 있는 풍력 발전기를 사용하였으며 제원은 **Table 3**과 같다. 타워의 높이가 31.5 m 이며 발전기내 전력선에는 최대 341 A의 전류가 흐르게 제작되었다.

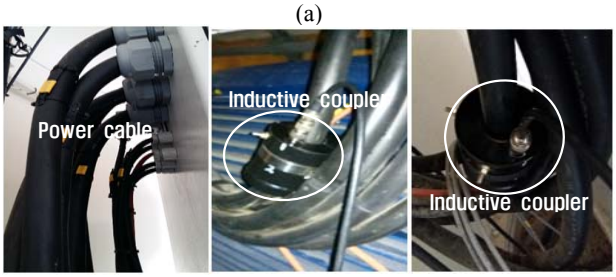
**Table 3:** Specifications of the midrange wind turbine

| Model | ACSA-A27 |
|---|---|
| Rotor diameter | 27 m |
| Hub height | 31.5 m |
| Generator | 6 poles |
| Output | 225 kW |
| Current | 341 A |
| Voltage | 480 Vca ± 5% |
| Frequency | 60 Hz ± 2% |

풍력발전기내부에 기 설치된 전력선을 이용하여 무배선 통신 시험을 위한 시스템의 구성은 **Figure 5 (a)**와 같다. 상부의 나셀 내부에 위치한 발전기의 전력선에 유도성 결합장치를 체결하고 전력선 모뎀을 연결하였다. 또한 하부의 변압기로 연결되는 동일한 전력선에도 결합장치를 연결하여 무배선 통신 시 발생할 수 있는 잡음특성을 분석하고 데이터 통신 속도와 통신 성공률을 측정하였다. 이를 기반으로 실시간 영상 전송을 실시하였다. **Figure 5 (b)**와 같이 3상 3선식으로 6개의 전력선을 가진 배선 구조이며, 전력선에 결합장치를 설치한 모습은 **Figure 5 (c)**, **Figure 5 (d)**와 같다.




(a)



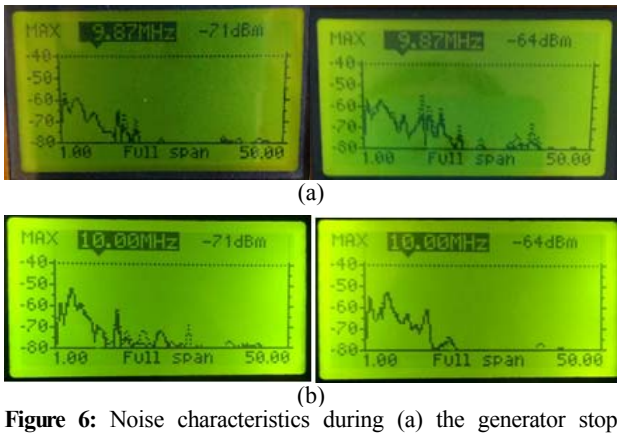

(b) (c) (d)

**Figure 5:** Experimental setup. (a) Schematics of the test-bed, (b) 6 power cables of generator, (c) inductive coupler units installed on the cable in the nacelle and (d) in the part of the transformer

### 3.1 전력선 잡음 특성 측정

발전기 운용 상태에 따른 선로 특성 분석을 위해 전력선 스펙트럼 분석기 (PROPOWER-5 by Promax)를 이용하여 잡음 수준을 측정하였다. 1-50 MHz 주파수 대역에서 **Figure 5**과 같은 6개의 선로에 매우 낮은 수준의 잡음이 확인되었다. 발전기 가동 전에는 -60 dBm 이하이며, 가동 후에는 -50 dBm 이하임을 알 수 있다.

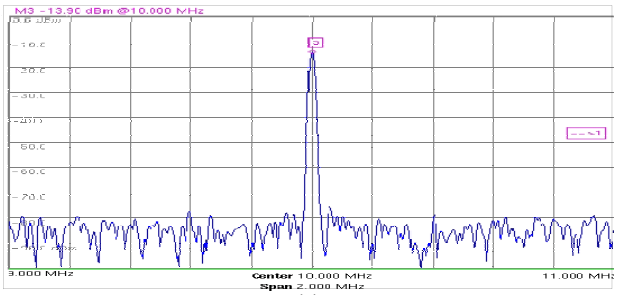
**Figure 7**은 10 MHz 주파수를 가지는 신호원의 입사전력에 대한 출력신호의 전력을 보여준다. 발전기의 가동 여부에 관계없이 거의 동일한 출력 스펙트럼 특성을 보이고 있으며 신호 대 잡음비는 60 dB 이상이다. 이러한 결과를 종합해 보면 풍력발전기 내부의 기본 전력선을 무배선 전력선 통신 선로로 통합 운용하는 것이 가능함을 보여준다.



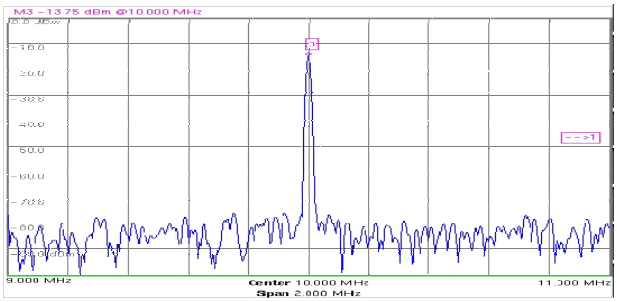

(a)

(b)

**Figure 6:** Noise characteristics during (a) the generator stop and (b) operation




(a)




(b)

**Figure 7:** Peak power measurement at 10 MHz signal frequency during (a) the generator stop (-13.90 dBm) and (b) operation (-13.75 dBm)

### 3.2. 주파수 특성 분석

**Figure 8**은 **Figure 3**에서 보인 결합장치의 주파수별 삽입손실을 보여준다. 100 kHz이하의 저주파 영역에서 감쇄가 크게 나타나지만 그 이후 주파수에서 40 MHz 부근 영역까지는 -3dB 이하의 저 손실 특성을 가진다. 본 연구를 위해 개발한 결합장치가 전력선 통신 주파수 영역에서 잘 동작할 수 있음을 보여준다.

발전기 운용 상태에 따른 선로 특성과 결합기의 주파수에 따른 신호 감쇄 정도를 측정하기 위하여 나셀의 발전기 전력선에 신호 발생기를 이용하여 1~30MHz의 가변 주파수

에 대하여 0 dBm의 정현파 신호를 인가하고, 변압기 앞단의 전력선에 RF 스펙트럼 분석기를 설치하여 출력파형을 측정하였으며 그 결과는 **Figure 9**와 같다. 20MHz 부근에서 -27 dBm 부근의 출력전력을 유지하지만 그 이후 주파수에서는 손실이 급격히 증가함을 보여준다. 이는 풍력발전기 내부 전력선의 주파수 특성이 주파수가 높아질수록 저하됨을 의미하므로 전력선 통신에서 통신선로의 임피던스 특성이 중요함을 시사한다.

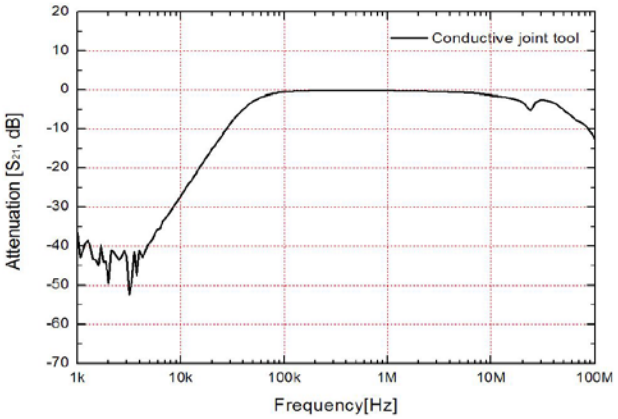



**Figure 8:** Attenuation of the inductive coupler unit

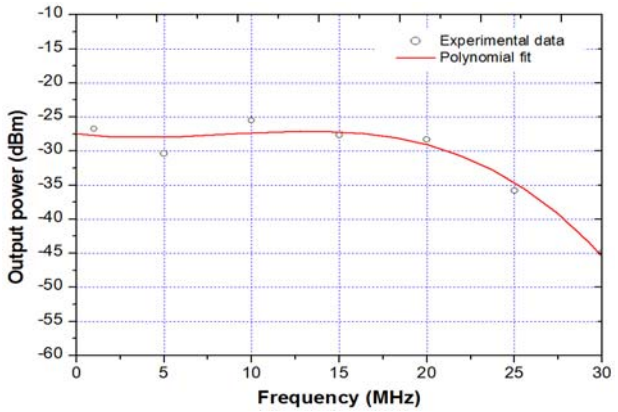



**Figure 9:** Power cable coupling loss of the wind turbine with respect to the frequency

### 3.3 데이터 통신 시험

발전기 운용 상태에 따른 선로 특성 분석 결과 전력선 통신 네트워크 구축 가능성을 확인하였으며, 실제적인 데이터 통신을 위해 통신 속도 및 통신 성공률을 측정하였다. TCP/IP 통신의 네트워크 속도 측정은 iperf 프로그램을 이용하였으며, 통신 성공률을 측정하기 위해서는 ping 명령어를 이용하였다. TCP/IP 통신에서 평균 전송속도는 **Figure 10**과 같이 발전기 가동 전이 47.5 Mbps, 가동 후에는 44.9 Mbps로 측정되었다. 발전기 가동 유무에 따른 데이터 전송속도는 큰 차이가 발생하지 않았으며 20 패킷의 데이터를 모두 송수신 받으며 성공률 100%인 것으로 확인되었다.

**Figure 11**은 나셀 내부에 설치한 CCTV 영상을 실시간 전송하여 풍력 발전기 입구에 설치된 모니터링 PC 화면에서 받아보고 있다. 그림과 같이 영상 전송까지 가능함을 확인하였으므로 실제 전력선 기반 무배선 통신 네트워크를 활용한 감시 시스템이 수 십 미터 이상 높이의 풍력 발전기에 적용 가능함을 보여준다.

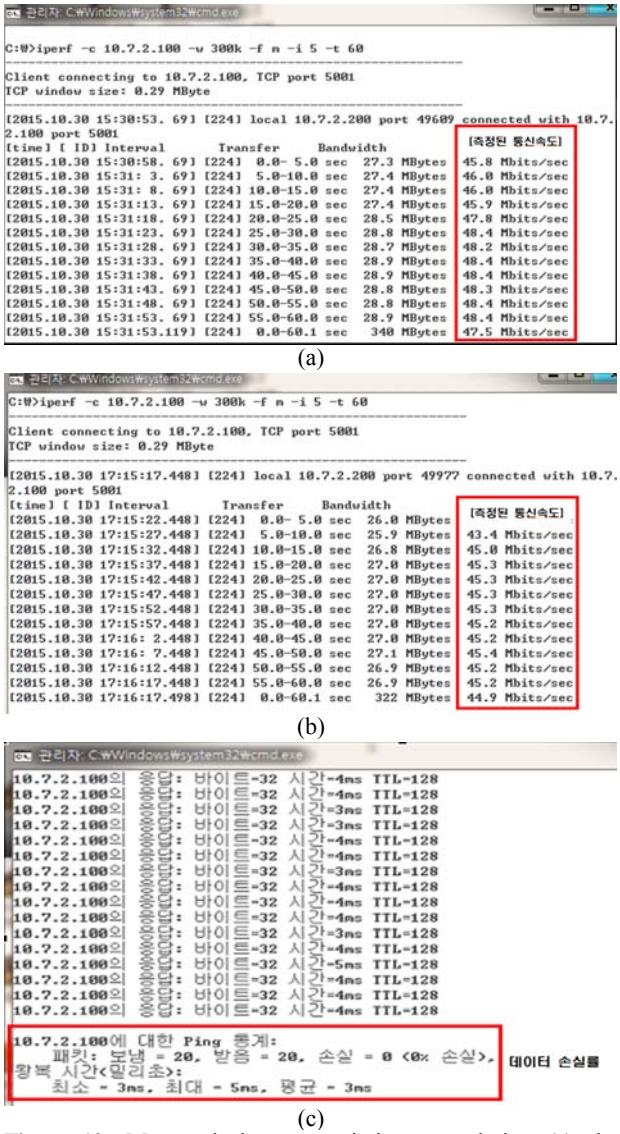



**Figure 10:** Measured data transmission rate during (a) the generator stop and (b) operation (c) packet loss

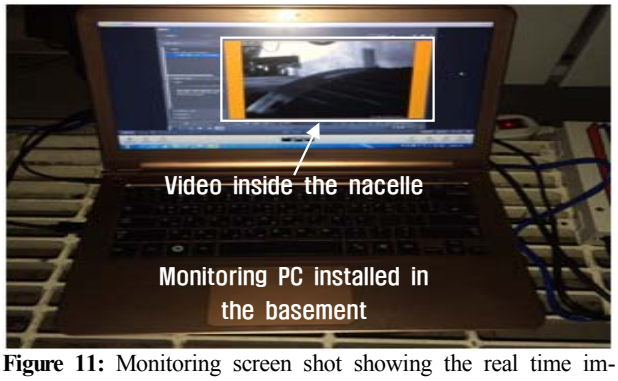



**Figure 11:** Monitoring screen shot showing the real time image inside the nacelle

## 4. 결 론

본 연구에서는 운행 중인 풍력발전기에 전력선 통신시스템을 이용한 통합 통신네트워크를 구축하는 방안을 제시하였다. 이를 위하여 발전기 내에 설치된 전력선을 기간통신망으로 활용하고, 전력선과 데이터 통신 기기 간의 통신을 위한 유도성 결합장치와 복합통신장치를 사용하였다. 실제 운영되는 31.5 m 높이의 225 kW급 풍력발전기를 대상으로 실증시험을 진행하였다. 발전기 운용 상태에 따른 선로 특성 분석 결과 전력선 통신 네트워크 구축 가능성을 확인하였으며 구현된 전력선 통신 시스템은 약 43 Mbps 이상의 전송속도를 제공하고 통신 성공률은 100%인 것으로 측정되었다. 풍력발전기 내부 30 m 이상 길이의 전력선을 통신선로로 활용한 CCTV 영상 전송 시험 또한 성공함으로서 중대형급 풍력 발전기의 안전감시를 위한 실시간 모니터링 시스템 적용이 가능함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업과 한국산업기술진흥원의 지역주력산업육성사업 및 한국연구재단의 산학협력선도대학 육성사업의 지원으로 수행된 연구결과물입니다. 풍력발전기 사용을 허락해주신 목포대학교 LINC 사업단 관계자께 감사드립니다.

## References

[1] Global Wind Energy Council, http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR.pdf, Accessed May 23, 2016.

[2] German Wind Energy Association, https://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/year-book-wind-energy-2015/wem_2015.pdf, Accessed May 23, 2016.

[3] Korea Institute of S&T Evaluation and Planning, https://www.google.co.kr/webhp?tab=Tw&ei=oUtCV8iaB8G_mwWx4K2YAw&ved=0EKkuCAQoAQ#q=Green-tech+Research%2C+Korea+Institute+of+S%26T+Evaluation+and+Planning(KISTEP)%2C+2011, Accessed May 23, 2016.

[4] C. C. Ciang, J. R. Lee, and H. J. Bang, “Structural health monitoring for a wind turbine: a review of damage detection methods,” Measurement Science and Technology, vol. 19, no. 12, p. 122001, 2008.

[5] H. G. Kim, S. G. Lee, and K. S. Han, “Global status of wind energy market and industry,” Journal of Wind Energy, vol. 4, no. 2, pp. 5-11, 2013.

[6] I. S, Yang, S. W. Kim, and N. H. Kyung, “A classification of the wind turbine accident,” Journal of the Korean Salar Energy Society, vol. 25, no. 4, pp. 29-35, 2005.

[7] A. L. Pattener, “SCADA and communication networks for large scale offshore wind power systems,” Proceeding of Renewable Power Generation, pp. 1-6, 2011.

[8] W. Yang, P. J. Tavner, C. J. Crabtree, Y. Feng, and Y. Qiu, “Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges,” WIND ENERGY, vol. 17, no. 5, pp. 673‐693, 2012.

[9] 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 Korean Institute of Information and Communication Engineering, vol. 19, no. 4, pp. 877-887, 2015.

[10] H. S. Kim and S. G. Kang, “A powerline-based legacy-line communication system for implementation of a communication network in ship,” Journal of the Korean Institute of Information and Communication Engineering, vol. 19, no. 8, pp. 1831-1838, 2015.

[11] Y. J. Lin, H. Latchman, and M. Lee, “A power line communication network infrastructure for the smart home,” IEEE Wireless Communications, vol. 9, no. 46, pp. 104-111, 2002.