



Received: 2026/05/26
Revised: 2026/06/07
Accepted: 2026/06/16
Published: 2026/06/30

***Corresponding Author:**

Seongwon Oh

Rm 6213, No.2 Building, 91 Haeyangdaehak-ro,
Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea
Tel: +82-61-240-7123
Fax: +82-61-240-7278
E-mail: osw123@mmu.ac.kr

Abstract

본 연구에서는 풍력발전기 앞에서 전파를 송신하고 풍력발전기 뒤쪽 구간에서 수신 전력을 측정함으로써 발전기에 의한 차폐 영향을 분석하였다. 측정 결과 풍력발전기 뒤로 약 400 m까지도 차폐 영향이 크게 나타났으며, 이는 실측 환경을 반영한 시뮬레이션 결과와도 상당히 유사했다.

In this study, the shadowing effect caused by a generator was analyzed by transmitting radio waves in front of a wind turbine and measuring the received power in the section behind the wind turbine. The measurement results show that the shielding effect was significant up to approximately 400 m behind the wind turbine, which is similar to simulation results reflecting the actual measurement environment.

Keywords

풍력발전기(Wind Turbine),
전파 차폐(Radio Wave Shadowing),
레이더(Radar), 광선 추적법(Ray Tracing),
드론(Drone)

풍력발전기에 의한 전파 차폐 영향성 분석

Analysis of Effect of Radio-Wave Shadowing by Wind Turbine

박태용, 오성원*

국립목포해양대학교 해군사관학부 부교수

Tae-Yong Park, Seongwon Oh*

Associate professor, Div. of Naval Officer Science, Mokpo National Maritime
University

1. 서론

레이더는 전파의 직진성, 등속성, 반사성을 이용하여 표적을 탐지하는 장비로, 레이더와 표적 간 LOS(line of sight, 가시선) 구간에 장애물이 있으면 장애물 뒤쪽에 전파가 도달하지 않거나 수신 전력이 약해지는 구간, 즉 차폐(shadowing) 구간이 발생한다. 만일 장애물의 크기가 작고 전파가 잘 통과하는 재질이라면 차폐 현상이 적을 수 있으나, 풍력발전기 타워는 전도도가 높은 대형 금속 구조물이므로 전파를 투과하지 않는다[1]. U.S. DoE(United States Department of Energy, 미국 에너지부)는 풍력 터빈 허브의 평균 높이가 점점 높아져 2016년 약 100 m에서 2035년에는 150 m에 이를 것으로 전망하였는데[1,2], 점점 커지는 풍력발전기로 인해 레이더 차폐 영향 또한 커질 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 풍력발전기 뒤쪽 구간에서 수신 전력을 측정함으로써 발전기에 의한 차폐 영향을 분석하였으며, 세부 실험 및 분석 방법은 다음과 같다. 먼저, 육상에 신호발생기(signal generator)를 설치하고, 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer)를 드론에 탑재하여 풍력발전기 뒤쪽으로 멀어지며 지그재그(zigzag) 경로로 비행하면서 신호발생기와 스펙트럼 분석기 간 LOS(가시선 확보) 상황과 풍력발전기에 의한 Non-LOS(가시선 미확보) 상황의 수신 전력을 측정하였다. 측정 후 경로를 따라 수집된 데이터를 통해 위치에 따른 풍력발전기에 의한 차폐 영향을 분석하였고, 광선 추적법(ray tracing) 기반 전파 영향 분석 프로그램인 Wireless Insite를 이용하여 측정 환경과 유사한 환경을 반영하여 시뮬레이션한

결과를 실측 데이터와 비교하였다.

2. 장애물에 의한 전파 차폐 범위

진행 중인 전파는 직진하는 특성 때문에 장애물을 만나면 장애물 뒤쪽에는 전파가 도달하지 않지만, 전파의 또 다른 특성인 회절과 둥근 표면을 따라 유기된 전류로 인해 발생하는 **creeping wave**로 인해 장애물 뒤쪽으로 일정 거리 이상 멀어지면 전파가 도달하기도 한다. 회절의 영향은 주파수가 낮을수록 두드러지고 주파수가 높을수록 적어진다. Fig. 1(좌)은 원기둥 표면의 회절 현상에 의해 차폐 범위가 줄어든 것을, Fig. 1(우)은 회절 현상이 없는 경우를 나타낸 것이다[3].

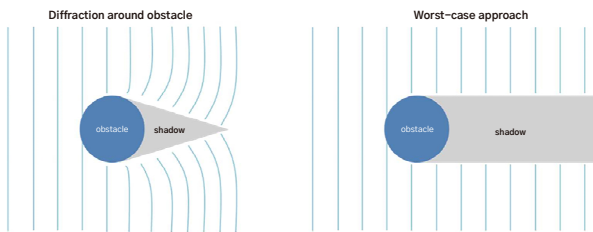


Fig. 1. Graphical illustration of diffraction effects

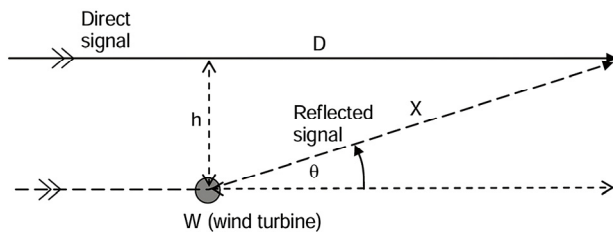


Fig. 2. Path difference geometry for shadow width calculation

EUROCONTROL(유럽항행안전기구)은 풍력발전에 의한 차폐 범위를 Fig. 2와 같이 직진하는 신호(direct signal)와 풍력발전기에서 반사된 신호(reflected signal)가 만나 위상의 영향으로 상쇄간섭이 발생하는 구간으로 정의하며, 이에 따르면 신호의 파장이 λ , 발전기 뒤쪽의 거리가 D 일 때 차폐 범위의 절반인 h 를 식 (1)과 같이 구할 수 있다[4]. h 는 차폐 범위의 절반이므로 거리와 파장에 따른 차폐 범위는 $2h$ 가 된다. 즉, EUROCONTROL이 정의하는 차폐 범위는 풍력발전기 뒤쪽으로 멀어질수록, 주파수가 낮을수록 넓어진다.

$$h = \sqrt{\lambda D} \quad (1)$$

풍력발전에 의한 통신 및 항해장비에 대한 영향을 분석 및 실증한 연구에 의하면, VHF, GPS(global positioning systems) 수신기, 휴대 전화 및 AIS(automatic identification system) 등 통신장비에 대한 풍력발전기의 영향은 미미하고, UHF 및 기타 마이크로파 시스템은, 풍력발전기가 LOS 구간에 위치할 경우에 차폐에 의한 영향을 받는 것으로 분석하였다([5], pp. 8-9). 또한 풍력발전기는 레이더에 대해서는 강한 반사파를 발생시켜 조기에 탐지될 수는 있으나, 근거리에서는 풍력발전기가 다중반사나 사이드 로브에 에코를 만들어 낼 수 있으며, 표적식별과 방위 분해능의 성능 저하를 초래하였음을 실증하였다. 이와 같이 특히 레이더에 대하여 LOS상의 풍력발전기는 성능을 저하시킬 수 있음을 이론과 실험을 통해 증명하였으나, 구체적으로 어느 정도의 성능 감소가 발생하는지에 대한 실험은 거의 전무한 실정이다. 따라서, 이후 장에서 먼저 시뮬레이션을 통해 성능 저하가 발생할 것으로 예상되는 지점을 식별한 이후, 드론을 이용한 실측을 통해 구체적인 성능 저하의 정도를 제시하고, 최종적으로 시뮬레이션과 실측과의 차이를 분석하였다.

3. 시뮬레이션

DEM(digital elevation model, 수치표고모델)과 3차원 CAD 모델 및 재질 정보 등을 반영하여 광선 추적법 기반의 시뮬레이션 프로그램인 **wireless insite**를 통해 전파 경로 및 수신 전력 등을 분석하였다.

시뮬레이션에 반영한 풍력발전기 타워는 하단부 직경 4.5 m, 상단부 직경 3 m의 철재 기둥으로, 블레이드는 직경 113 m, 비유전율 2.4로 설정하였다. 송신 안테나는 MODEL 3115 혼 안테나 제원을 반영하여 수평 빔폭 42도, 수직 빔폭 42도, 이득 10 dBi로 설정하였고, 수신안테나는 풍력발전기 좌우 100 m, 뒤쪽 500 m 구역에 2 m 간격으로 해발고도 10 m에 다이폴 안테나를 배치하였다. 송신 파형은 주파수 3 GHz의 정현파이며, 송신 출력 15 dBm, 경로 추적을 위한 ray 간격은 0.1도, 반사 횟수 6회, 회절 횟수 1회로 설정하였다.

시뮬레이션 결과 Fig. 3와 같이 풍력발전기 뒤쪽으로 거리가 멀어질수록 회절에 의한 영향으로 수신 전력은 높아지지만 영향을 받는 폭은 넓어졌다.

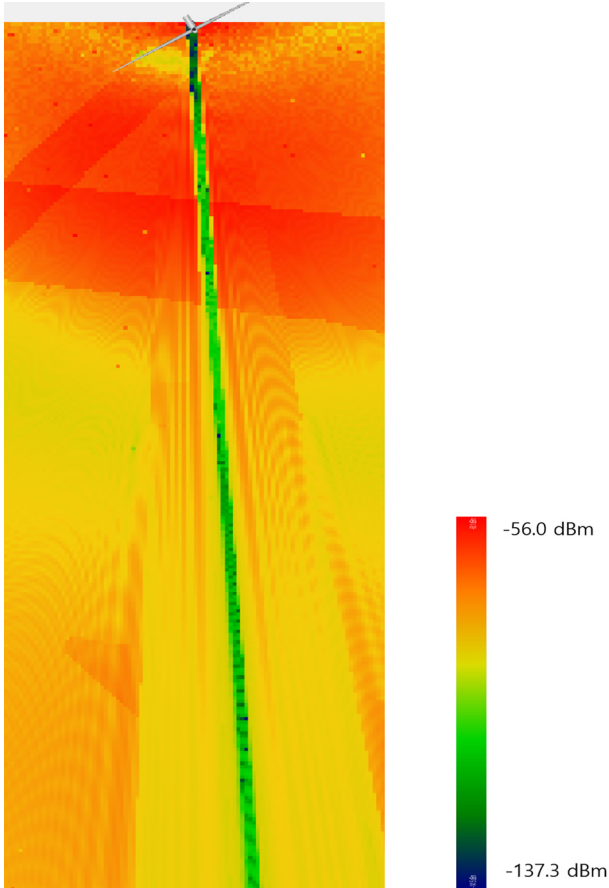


Fig. 3. Simulation result (shadow zone)

4. 전파차폐 측정 및 분석

4.1 측정 방법

풍력발전기에 의한 차폐 범위를 분석하기 위해 전남 영광군에 있는 풍력발전단지에서 드론을 이용하여 실험을 진행하였다.

측정 장비는 AARONIA BPSG 6 신호발생기, SIGNAL HOUND SA 124B 스펙트럼 분석기, ETS-LINDGREN MODEL 3115 혼 안테나이다.

송신 지점과 풍력발전기 간 거리는 159 m이고, Fig. 4와 같이 스펙트럼 분석기를 드론에 탑재하여 풍력발전기 뒤쪽 70 m부터 409 m 구간의 고도 10 m 지점의 수신 전력을 측정하였다. 송신 지점과 수신 지점 간 거리는 최단 229 m, 최장 568 m이다. 영광풍력

발전기는 U113 모델로, 허브까지의 높이는 100 m이고, 타워의 하부 직경은 4.5 m 가량으로 추정된다.

Table 1. System parameters and location data for the experiment

Category	Details
Frequency	3 GHz
Tx Power	15 dBm
Tx Antenna	Directional Antenna(Horn) - Gain: 10 dBi @ 3 GHz
Rx Antenna	Omni-directional Antenna(Dipole)
Tx Ant. Coordinates	35.247408°N, 126.341687°E
Wind Turbine Coordinates	35.245981°N, 126.341792°E

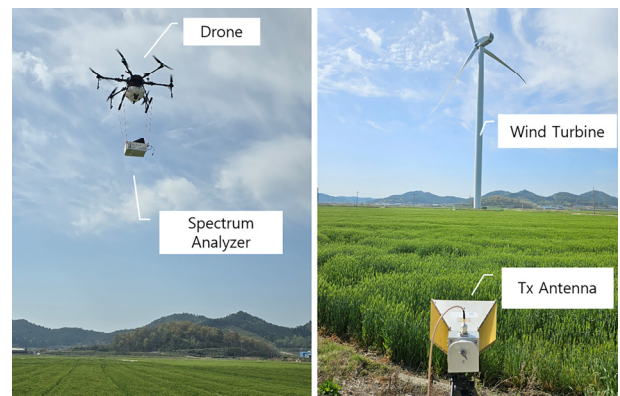


Fig. 4. Overview of the measurement setup

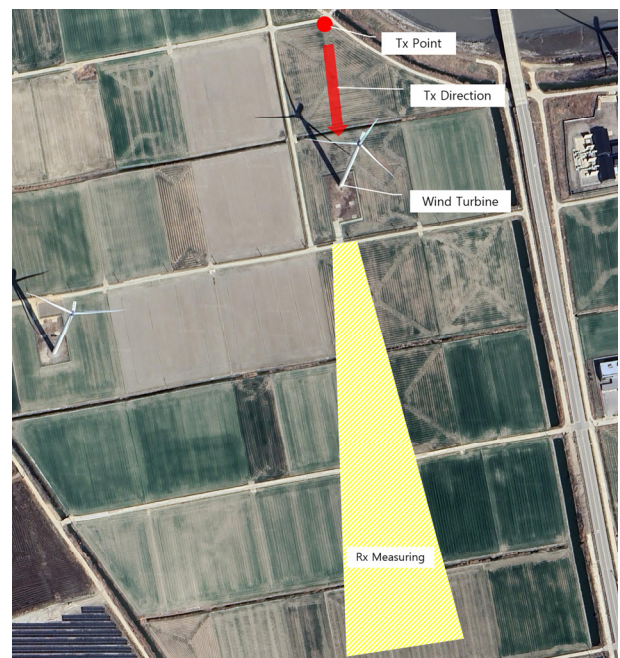


Fig. 5. Experimental layout

4.2 수신 전력 측정 결과

Fig. 5는 드론을 이용한 측정 구역으로 빔폭을 고려한 non-LOS보다 약간 확장된 구역이다. 드론을 이용한 전파 품질 측정에서는 전체 구역을 지그재그로 측정하지만[6,7], 비행시간의 제한과 풍력발전기에 의한 차폐 구역을 정확하게 식별하기 어렵기 때문에 드론이 non-LOS와 LOS 구역을 넘나들도록 비행경로를 설정하였다. Fig. 6는 드론 경로와 이에 따른 수신 전력을 지도에 나타낸 것으로, 위치 간격은 약 3 m이고, 수신 전력에 따라 6가지 색으로 구분하였다. 수신 전력은 최대 -55.34 dBm에서 최소 -88.05 dBm까지 분포하였다. Non-LOS에 해당하는 경로에서는 시뮬레이션과 유사하게 수신 전력의 차이를 확인할 수 있다.

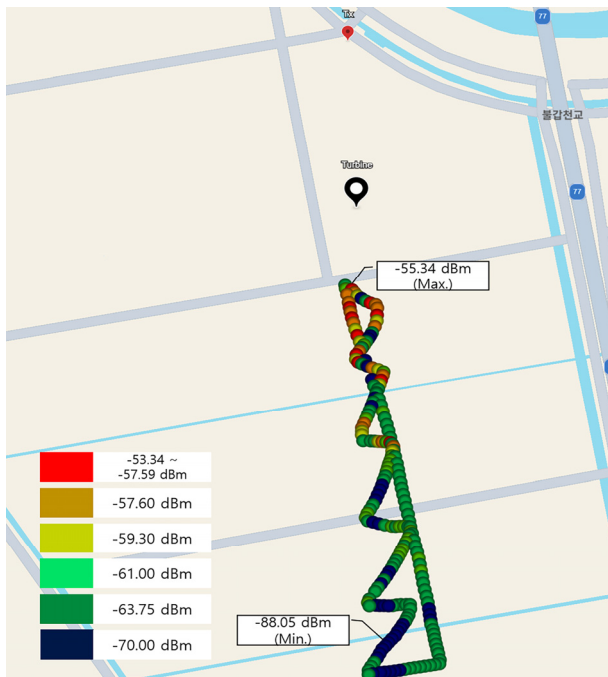


Fig. 6. Drone trajectory & received power

Fig. 7은 풍력발전기에서 가장 먼 구간, 즉 풍력발전기 뒤쪽으로 약 400 m 떨어진 구간에서의 수신 전력을 구체적으로 나타낸 것이다. 측정 방향은 왼쪽에서 오른쪽이며, 초록(LOS 구역)색과 진청색(non-LOS 구역)의 경계에서 수신 전력 변화는 -66.03 dBm에서 -72.68 dBm으로, 진청색과 초록색의 경계에서 수신 전력 변화는 -70.17 dBm에서 -66.65 dBm으로, 각각의 차이는 6.65 dB와 3.52 dB이다.

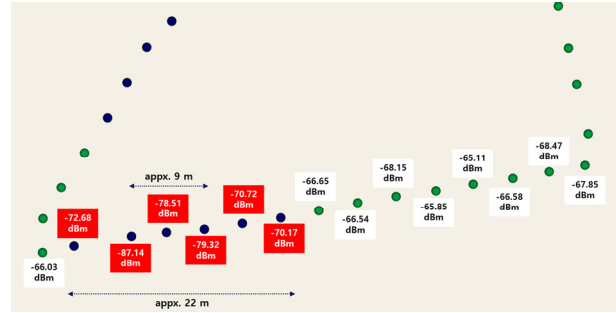


Fig. 7. Received power at furthest section

해당 구간에서 다른 위치 대비 수신 전력의 3 dB 이상 낮은 구간의 폭은 약 22 m, 10 dB 이상 낮은 구간의 폭은 약 9 m이다.

4.3 측정 경로를 반영한 시뮬레이션

풍력발전단지에서 측정한 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하기 위해 드론의 비행 경로를 반영하여 다시 시뮬레이션을 수행하였다.

측정 시 드론은 GPS 위치를 저장하였으며 이를 바



Fig. 8. Simulation result (trajectory & received power)

탕으로 방향을 바꿨던 위치를 변침점(way point)으로 설정하고, 변침점을 기준으로 수신기를 경로에 따라 3 m 간격으로 해발고도 10 m에 배치하였다. 나머지 조건은 앞서 시뮬레이션과 동일한 주파수, 출력, 송신안테나 특성, 수신안테나 특성 등을 반영하였다.

Fig. 8은 드론 GPS 경로를 바탕으로 다시 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 실측 데이터인 Fig. 6와 비교하면 전반적인 패턴이 유사하게 나타났다. 특히 풍력발전기 뒤쪽 송·수신 지점 간 non-LOS 구간 및 LOS 구간 인근에 발생하는 차폐 구역의 수신 전계의 범위는 차이가 미미한 것으로 나타났다.

Fig. 9은 송신 지점에서 가장 먼 구간에 대한 시뮬레이션 결과를 구체적으로 나타낸 것으로, Fig. 7과 패턴이 유사하다. 해당 구간에서 다른 위치(LOS 구간) 대비 수신 전력이 3 dB~5 dB 가량 낮은 구간의 폭은 약 24 m, 10 dB 이상 낮은 구간의 폭은 약 9 m이다. 이러한 차이는 드론이 풍력발전기에 완전히 차폐되었는지 또는 원통형 구조물에 의한 회절파가 영향을 미치는 구역인지 등에 따른 차이로 판단된다.

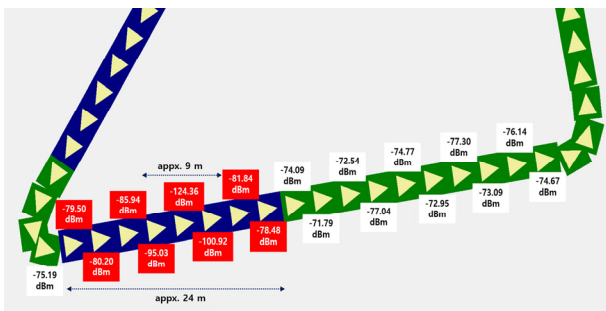


Fig. 9. Simulation result (furthest section)

5. 결론

본 연구에서는 신호발생기를 이용하여 풍력발전기 후방에 발생하는 차폐 영향을 측정하고, 실측 환경을 반영하여 시뮬레이션을 실시하였다. 측정 결과 발

전기 뒤 409 m까지도 non-LOS 구간에서는 LOS 구간 대비 수신 전력이 20 dB 이상 낮게 나올 정도로 먼 거리에서도 차폐 영향이 유의미하게 나타남을 확인할 수 있었고, 시뮬레이션 결과와 상당한 유사성을 보였다. 풍력발전기에 의한 전파 차폐 현상은 레이더 운용에 영향을 미칠 수 있어 관련 분야에 대한 심층 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] Tae-Yong Park, Sangjin Lee, and Seongwon Oh, 'Minimum Distance Between Offshore Wind Turbines and Maritime Surveillance Radars,' Journal of the KNST, VOL. 9, NO. 1, 2026, pp. 101-108.
- [2] Liz Hartman, Wind Turbines: The Bigger, the Better, August 21, 2024.
<https://www.energy.gov./cmei/articles/wind-turbines-bigger-better> (accessed 2026.05.11.)
- [3] TNO, Simple Engineering Assessment; The Effect of Wind Turbines at Walcourt on the Florennes STAR 2000 Primary Radar System Without and With Wind Farm Filter, TNO Report 2020 R11030, June 11, 2021.
- [4] EUROCONTROL Headquarters, EUTOCONTROL Guidelines for Assessing the Potential Impact of Wind Turbines on Surveillance Sensors, EUROCONTROL-GUID-0130, EUROCONTROL, 2014.
- [5] Maritime & Coastguard Agency, MGN 372 Amendment 1 (M+F), Safety of Navigation: Guidance to Mariners Operating in the Vicinity of UK Offshore Renewable Energy Installations (OREIs), November 2022.
- [6] Kunseok Kang, Hee Wook Kim, GwonHan Mun, and Daeho Kim, '3D Aerial LTE Quality Measurement and Analysis for UTM Communication,' The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, VOL. 47, NO. 1, 2022, pp. 66-75.
- [7] Hae-Chan Jang, Eun-Su Kim, Myung-Hyun Baek, Ju-Sung Han, and Byung-Jun Jang, 'Real-Time Measurement System for LTE/5G Radiowave MAP in the Sky Using Smartphone and Drone,' Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering & Science, VOL. 36, NO. 6, 2025, pp. 539-547.