



Received: 2026/03/02
Revised: 2026/03/13
Accepted: 2026/03/19
Published: 2026/03/31

***Corresponding Author:**

Seongwon Oh

Rm 6213, Building 2, 91 Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

Tel: +82-61-240-7123

Fax: +82-61-240-7127

E-mail: osw123@mmu.ac.kr

해상풍력발전기와 해상감시 레이더의 최소 이격 거리

Minimum Distance Between Offshore Wind Turbines and Maritime Surveillance Radars

박태용¹, 이상진², 오성원^{1*}

¹국립목포해양대학교 해군사관학부 부교수

²충남대학교 군사학과 박사과정

Tae-Yong Park¹, Sangjin Lee², Seongwon Oh^{1*}

¹Associate professor, Division of Naval Officer Science, Mokpo National Maritime University

²Ph.D. candidate, Department of Military Studies, Chungnam National University

Abstract

본 논문에서는 해상풍력발전기와 해상감시 레이더 간 다중 반사 경로에 의해 발생할 수 있는 레이더 허위 표적 발생 가능성을 분석하였다. 본 연구에서 설정한 레이더 및 풍력발전기 특성을 반영하여 분석한 결과, 레이더와 풍력발전기가 약 4 km 이상 떨어지면 다중 반사 경로에 의한 허위 표적 발생 가능성이 낮아진다. 다만, 실제 해상풍력 발전단지가 추진될 때는 인근 레이더와 풍력발전기의 특성을 반영한 분석 결과에 따라 레이더와 해상풍력 발전단지 간 최소 이격 거리를 설정하는 것이 타당하다.

This paper evaluates the potential for false radar targets caused by multipath reflections between offshore wind turbines and maritime surveillance radars. Simulation results, based on specific radar and turbine parameters, demonstrate that the probability of false targets decreases significantly at distances exceeding 4 km. Nevertheless, establishing a minimum separation distance for actual wind farm deployments requires a case-specific analysis that incorporates the distinct technical characteristics of the local radar and turbine systems.

Keywords

해상풍력 발전기(Offshore Wind Turbines), 레이더(Radar), 허위 표적(Ghost Target), 최소 이격 거리(Minimum Distance)

Acknowledgement

이 논문은 국립목포해양대학교 산학협력단 과제를 통해 (주)세광종합기술단의 지원으로 수행되었음.

1. 서론

IEA(International Energy Agency, 국제에너지기구)는 '24년 말 기준 전 세계 풍력발전 설비 용량은 1,136 GW이며, 기존에는 육상풍력이 주도했으나 향후에는 해상풍력이 성장을 견인할 것으로 전망하였다[1]. IEA 시나리오 기준 '30년까지 누적 설치 용량은 285 GW, 연간 신규 설치량은 '23년 9.5 GW에서 '30년에는 45 GW까지 급증할 것으로 전망했다[1]. 풍력 터빈의 크기가 증가하면 터빈 1기당 전력 생산량이 증가하여 동일 용량 대비 터빈의 수가 감소하므로 BOP(ballance of plant) 및 유지보수 비용이 감소하기 때문에 터빈 용량이 증가하는 추세이며, 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 전망하였다[2,3].

전파를 이용하여 표적을 탐지하는 장비인 레이더는 표적과의 경로에 구조물이 있으면 전파 경로가 차단되어 표적이 탐지되지 않거나 탐지율이 낮아지는 차폐(shadowing), 구조물 간 다중 반사에 의한 허위 표적(ghost)과 미러링(mirroring) 등의 현상이 발생할 수 있다. 따라서 대형 구조물인 해상풍력 발전단지는 레이더를 운용할 때 차폐와 허위 표적을 발생시키는 원인이 될 수 있다. 해상풍력 발전단지를 오래 전부터 건설해 온 유럽과 미국 등에서는 관

련 연구를 통해 풍력발전기가 레이더 운용에 미치는 영향을 사전에 검토하고 예상되는 문제 해결을 위한 절차와 기준이 있으나, 항공관제 레이더가 주요 대상이고, 해상 표적을 대상으로 마련된 별도의 기준은 미흡하며, 우리나라는 관련 절차와 기준이 아직도 수립되어 있지 않은 것이 현실이다.

레이더 차폐 현상은 차폐가 발생하는 구역을 감시할 수 있는 infill 레이더를 추가하거나 인접한 레이더 사이트의 표적 데이터를 융합하는 형태로 해결할 수 있지만, 다중 반사에 의한 허위 표적 발생을 막기 위해서는 다중 반사 경로로 수신되는 신호가 레이더 수신감도보다 낮아지도록 다중 반사 요인이 되는 장애물과의 거리를 충분히 떨어뜨려야 한다.

본 연구에서는 해상풍력발전기에 의한 레이더파의 다중 반사로 인해 해상감시 레이더에 허위 표적이 발생할 수 있는 상황을 여섯 가지로 구분하고, 허위 표적 발생 가능성을 분석함으로써 다중 반사에 의한 허위 표적이 발생하지 않기 위해 해상풍력발전기와 해상감시 레이더 간 최소 이격 거리 검토 방안을 제안하였다.

2. 풍력발전기에 의한 레이더 간섭 현상

2.1 레이더파 차폐

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. 차폐 구간은 회절에 의한 영향으로 구조물 뒤에서 멀어질수록 차폐 영향이 점차 줄어들기는 하지만, 다수의 구조물에 의한 위상 간섭으로 차폐 영역이 넓을 수도 있다.

Fig. 1(좌)는 단일 구조물에 의한 차폐 영역을, Fig. 1(우)는 다수의 구조물에 의한 위상 간섭으로 인해 차폐 영역이 형성되는 상황을 나타낸 것이다[4]. 풍력발전기에 의한 차폐 영역에 있는 표적은 LOS가 확보된 표적보다 수신 전력이 낮으므로 탐지율이 떨어질 수 있다.

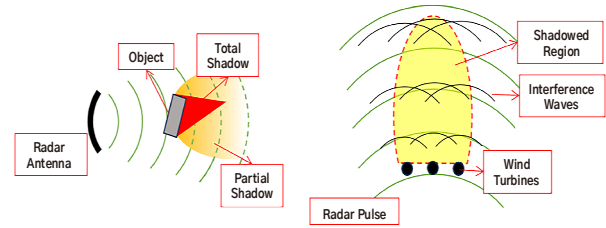


Fig. 1. Shadowing effect by obstacles

2.2 수신 감도 저하

대부분의 레이더는 수신되는 전력이 지나치게 강하거나 잡음 수준이 높은 환경에서는 수신 감도를 낮추고, 수신되는 전력이 약하거나 잡음 수준이 낮은 환경에서는 수신 감도를 높여 일정 수준의 false alarm rate(오경보율) 수준을 자동으로 일정하게 유지하는 CFAR(constant false alarm rate) 기능이 있다. 레이더 인근에 풍력발전기와 같이 RCS(radar cross section, 레이더 반사 면적)가 매우 큰 표적이 있으면 수신되는 평균 전력이 높아져 수신 감도가 자동으로 낮아질 수 있어 RCS가 작거나 거리가 멀어서 수신 전력이 약한 표적의 탐지율이 떨어질 수 있다.

2.3 허위 표적

레이더 안테나에서 송신된 전파가 표적에서 반사된 후 다른 구조물에 반사되어 다중 반사 경로로 수신되면 실제로는 존재하지 않는 허위 표적이 레이더 전시기에 나타나게 된다. 이러한 현상은 선박에 설치된 레이더의 레이더파가 선체 구조물에 반사되어 허위 표적이 발생하거나 해상풍력발전기 타워에 설치된 레이더의 레이더파가 풍력발전기 타워에 반사되어 허위 표적이 발생한 사례로 확인된 바 있다[5]. Fig. 2(좌)는 표적에서 반사된 전파가 선박 마스트 구조물에서 반사되어 다른 방위에 허위 표적이 발생하는 과정을, Fig. 2(우)는 표적에서 반사된 전파가 풍력발전기에 맞고 표적으로 다시 반사되었다가 되돌아와 길어진 수신 경로만큼 먼 곳에 허위 표적이 발생하는 과정을 나타낸 것이다.

Fig. 2의 예는 다중 반사의 원인이 되는 구조물이 레이더와 수 m 이내에 있는 경우인데, 육상에서 운용하는 레이더의 가시권에 해상풍력 발전단지가 설치될 경우 풍력발전기에 의한 다중 반사로 인해 허위 표

적이 발생할 수도 있다. EUROCONTROL(유럽항공 안전기구)은 풍력발전기가 ATC(air traffic control, 항공교통관제) 시스템에 미치는 영향 평가를 위한 절차서에 항공기와 풍력발전기의 다중 반사에 의한 허위 표적이 발생할 수 있는 네 가지의 케이스를 제시하고 있다[6].

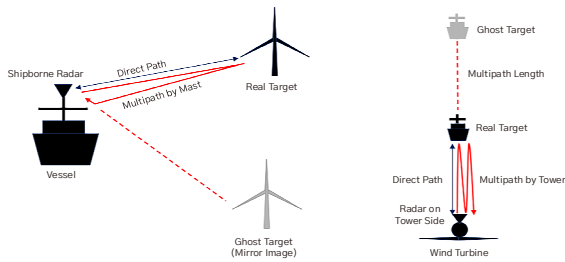


Fig. 2. Ghost target by multipath

본 논문에서는 EUROCONTROL에서 제시한 레이더 허위 표적 발생 케이스를 기반으로 해상 환경에서 다중 반사에 의한 허위 표적 발생 케이스를 설정하여 연구를 수행하였다.

3. 레이더 허위 표적 발생 가능성 분석

3.1 풍력발전기에 의한 다중 경로 발생 케이스

선박에 설치된 레이더나 풍력발전기 타워 하단부에 설치된 레이더와 같이 레이더 인근 수 m 이내에 있는 구조물에 의한 다중 반사는 전파 환경 분석을 통해 다중 반사를 유발하는 원인을 특정하여 전파 방사 구역 통제(sector blanking), 전파 흡수재 시공, 인근 구조물의 위치 조정 등으로 문제를 해결할 수 있다. 반면, 해상 또는 해안 감시를 목적으로 육상에 설치되어 있는 레이더 인근에 풍력발전기와 같은 대형 구조물이 설치되는 경우는 전파 환경 분석 범위가 매우 넓고, 다양한 간섭 경로가 발생할 수 있기 때문에 문제 해결 방안을 특정하기 보다는 발전단지와 레이더 간 적절한 거리를 둬으로써 레이더에 수신되는 전력을 낮추는 것이 합리적이다.

EUROCONTROL은 ATC 레이더를 대상으로 풍력발전기와 공중 표적(항공기) 간 다중 반사가 생길 수 있는 상황을 Case 1~Case 4까지 네 가지로 구분하였는데[6], 본 연구는 해상감시 레이더를 대상으로 하

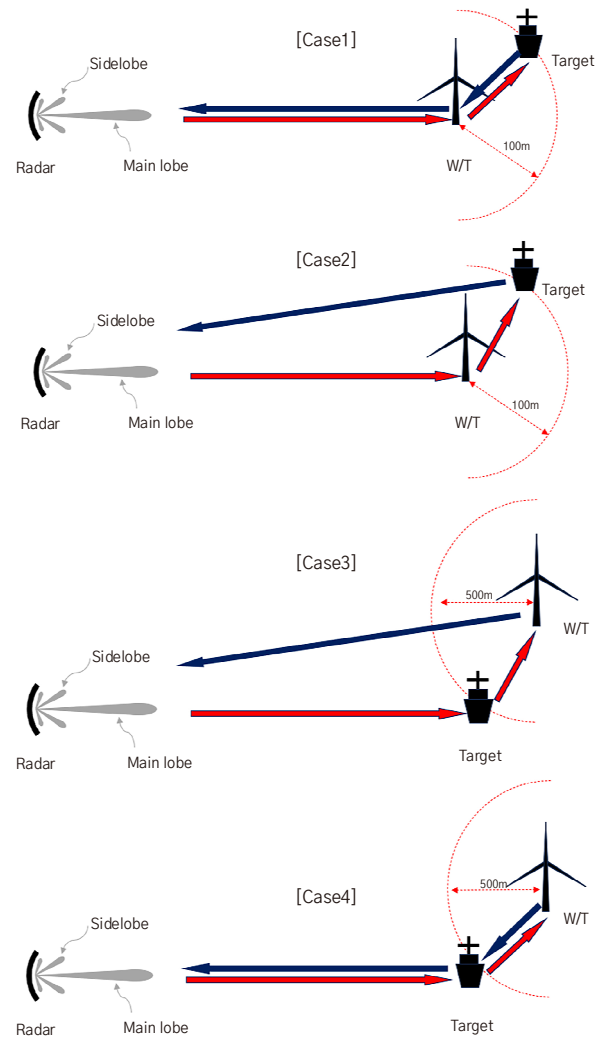


Fig. 3. Reflected cases between target and turbine

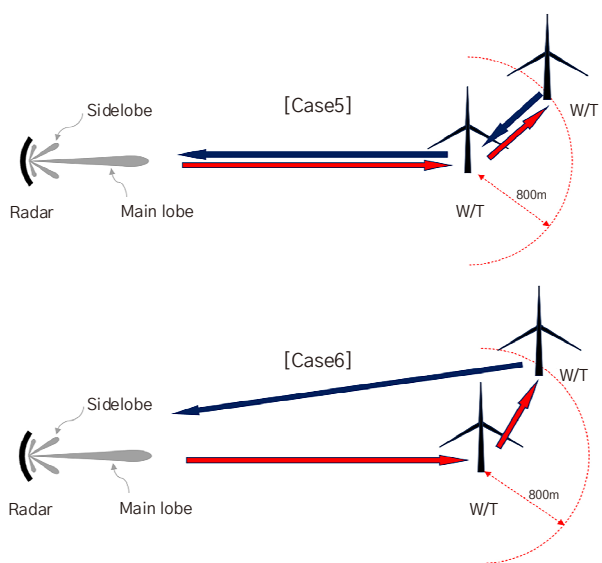


Fig. 4. Reflected cases between turbine and turbine

므로 Fig. 3와 같이 표적을 항공기 대신 해상 표적(선박)으로 대체하였다. 또한 Fig. 4와 같이 풍력발전기 간 다중 반사가 생길 수 있는 상황인 Case 5, Case 6를 추가하였다.

Case 1, Case 4, Case 5는 main lobe(안테나 주엽)에 다중 반사에 의한 신호가 수신되는 경우이고, Case 2, Case 3, Case 6는 sidelobe(안테나 부엽)에 다중 반사에 의한 신호가 수신되는 경우이다.

EUROCONTROL Case에서는 표적과 풍력발전기 간 거리를 정의하지 않았지만, 본 연구에서는 Case 별로 풍력발전기와 표적 간 가장 가까이 접근할 수 있는 거리를 설정하였다. Case 1과 Case 2는 레이더와 선박 사이에 풍력발전기가 있는 경우로, 일반적인 레이더의 방위-거리 분해능을 고려하여 풍력발전기와 선박의 최단 거리를 100 m로 설정하였고, Case 3과 Case 4는 레이더와 풍력발전기 사이에 선박이 있는 경우로, 해양법에 관한 국제연합 협약(UNCLOS, United Nations Convention on the Law of the Sea)에서 정의하는 안전 수역 거리에 따라 해상풍력 발전단지 인근을 항행하는 선박의 최소 이격 거리를 고려하여 500 m로 설정하였다[7,8]. Case 5와 Case 6는 해상풍력 발전단지 내 풍력발전기 사이의 거리로, 풍력발전기의 용량이 3 MW인 전북 부안군 서남해 해상풍력 실증단지를 참고하여 800 m로 설정하였다.

Table 1. Falcon II radar specifications

Category	Details
Frequency	5,450 - 5,825 MHz
Peak Power	55 kW
Average Power	1.5 kW
Range Resolution	85 m
Accuracy	20 m; 0.2 deg
Beamwidth	2.4 deg(Horizontal), 25 deg(Vertical)



3.2 해상감시 레이더 제원

선박용 레이더는 X-band(8~12 GHz)와 S-band(2~4 GHz)를, 해양경찰 VTS에서 운용하는 레이더는 X-band를 사용하고, 대한민국 해군이 도서지역에서 운용하는 해상감시 레이더는 주로 C-band(4~8 GHz)를 사용한다. Table 1은 Falcon II 해상감시 레이더 제원으로[9], 본 논문에서는 이를 해당 레이더의 성능 값으로 설정하였다.

풍력발전기는 원기둥 형태의 타워와 타워 최상단에 위치하는 나셀 및 로터로 구성되어 있다. 이 중 타워는 가장 큰 면적을 차지할 뿐 아니라 전기 전도도가 높은 금속으로 제작되어 타워의 RCS가 풍력발전기 전체 RCS의 대부분을 차지한다[10].

3.3 풍력발전기와 선박의 RCS

RCS는 표적의 거리가 안테나로부터 무한대일 때를 가정하여 입사파 대 반사파의 비율로, 평면파를 기준으로 계산한다. 안테나에서 방사된 구면파가 표적 전체에 평면파로 입사되기 위해서는 안테나와 표적 간 최소한의 거리, 즉 far field condition(원전계 조건)을 만족해야 하며, 표적의 길이와 전파의 파장에 따른 far field condition 충족 거리는 식 (1)과 같이 구할 수 있다[10-12].

$$R_0 = \frac{2L^2}{\lambda} \quad (1)$$

식 (1)에서 R_0 는 far field condition 충족 거리, L 은 표적의 최대 길이, λ 는 전파의 파장이다.

표적과 레이더 간의 거리가 far field condition을 충족하지 않아 표적 전체에 평면파가 입사하지 않으면 near field effect(근전계 효과)로 인해 레이더 반사파의 크기가 줄어들게 된다[11]. 이러한 현상은 결과적으로 레이더 관점에서 보는 표적의 등가 크기(equivalent size)가 실제 표적 크기보다 작아지는 효과로 이어지며, 레이더와 표적 간 거리 R_0 이 near field condition일 때 표적의 등가 길이 L_{nf} 는 식 (2)와 같다[10,12-14].

Fig. 5는 far field condition과 near field condition을 간략히 표현한 것이다.

$$L_{nf} = \sqrt{\frac{\lambda R}{2}} \quad (2)$$

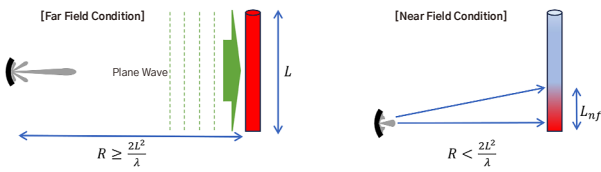


Fig. 5. Far field condition & near field condition

풍력발전기 타워는 U.S.DOE의 자료를 참고하여 높이 150 m로 설정하였고[3], 반지름은 5 m, 재질은 PEC(perfect electric conductor, 완전 도체)인 원기둥으로 설정하였다. 레이더파의 파장이 λ 일 때 far field condition일 경우 반지름 a , 길이 L 인 원기둥의 RCS(σ)는 식 (3)과 같고, 레이더와 풍력발전기 간 거리가 near field condition일 때는 거리에 따라 원기둥의 등가 길이가 식 (2)와 같이 변하므로 거리에 따라 RCS가 변하며, near field condition에서의 RCS(σ_{nf})는 식 (4)로 구할 수 있다.

$$\sigma = \frac{2L^2}{\lambda} (\pi a) \quad (3)$$

$$\sigma_{nf} = \frac{2L_{nf}^2}{\lambda} (\pi a) \quad (4)$$

Table 2. IALA target types

Target Type	Typically Representing	RCS[m ²]		
		S-band	X-band	C-band
1	AtoN without radar reflector. Small open boats, fiberglass, wood or rubber	≪1	1	-
2	In-shore fishing vessels, sailing boats and speed boats	1	3	-
3	Aids to Navigation with radar reflector	4	10	5.5
4	Small metal ships, fishing vessels and patrol vessels	40	100	55
5	Small coasters and large fishing trawlers	400	1,000	550
6	Large coasters, bulk carriers and cargo ships	4,000	10,000	5,500
7	Container carriers and tankers	40,000	100,000	55,000

IALA(International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, 국제항로표지기구)는 guideline에서 해상 표적의 종류에 따른 S-band와 X-band의 RCS 대푯값을 Table 2와 같이 정의하고 있다[15]. 원기둥의 RCS는 식 (3)과 같이 파장에 반비례하는데, Table 2에서 target type 3 이상의 표적부터는 S-band RCS는 X-band 대비 40%이며, 이는 X-band 파장 3 cm와 S-band 파장 7.5 cm 비율 40%와 일치한다. 이에 따라 Table 1에 기술한 해상감시 레이더의 주파수가 5.5 GHz(파장 5.45 cm)일 경우 C-band의 RCS는 Table 2와 같이 X-band 대비 55%로 설정하였다.

3.4 거리별 레이더 허위 표적 발생 가능성 분석

Fig. 3와 Fig. 4의 Case 1~Case 4에서 다중 경로에 의해 레이더로 수신되는 전력은 식(5)~식(8)로 구할 수 있고, 수신 전력이 레이더의 수신감도보다 높으면 레이더 전시기에 허위 표적으로 나타날 수 있다[6]. Case 5, Case 6은 Case 1, Case 2의 표적이 풍력발전기로 대체된 경우이므로 식 (5)와 식 (6)을 적용하면 된다.

보수적인 결과를 도출하기 위해 식 (5)~식 (8)에서 모든 입력 파라미터는 가장 가혹한 경우를 가정하였다. 표적 및 풍력발전기의 bi-static RCS는 mono-static RCS로 설정하였고, 지형에 의한 전파 감쇠율(terrain induced attenuation factor)은 1로 설정[6]하여 감쇠가 없는 것으로 가정하였다.

안테나의 효율이 1일 경우 수평 빔폭(θ), 수직 빔폭(ϕ)과 안테나 이득 간의 관계는 $4\pi/\theta\phi$ 인데, Table 1의 빔폭을 적용하면 안테나 이득(G_t, G_r)은 28.38 dBi이다. 수신안테나의 sidelobe 레벨($G_{r,s}$)은 기존의 연구를 참고하여 main lobe 레벨의 -30 dB로 설정하였다[16]. 풍력발전기의 RCS는 near field condition을 반영하여 레이더와의 거리에 따라 식 (4)를 통해 계산하였고, 표적(선박)의 C-band RCS는 Table 2를 그대로 적용하였다. Case 1, Case 2는 풍력단지 안의 선박이므로 소형 표적인 target type 3을, Case 3, Case 4는 풍력단지 외곽을 항행하는 선박이므로 가장 큰 표적인 target type 7을 적용하였다. 레이더 평균 송신 출력은 1,500 W, 수신 threshold는 -110 dBm으로 설정하였다.

$$(Case\ 1\&5) \quad P_{ref} = \frac{\sigma_{tg}\sigma_{w1}\sigma_{w2}F_{rw}^2F_{wt}^2G_tP_tG_r\lambda^2}{(4\pi)^5D_{rw}^4D_{wt}^4} \quad (5)$$

$$(Case\ 2\&6) \quad P_{ref} = \frac{\sigma_{tg2}\sigma_{w1}F_{rw}F_{wt}F_{tr}G_tP_tG_{rs}\lambda^2}{(4\pi)^4D_{rw}^2D_{wt}^2D_{rt}^2} \quad (6)$$

$$(Case\ 3) \quad P_{ref} = \frac{\sigma_{tg1}\sigma_{w2}F_{rt}F_{tw}F_{wr}G_tP_tG_{rs}\lambda^2}{(4\pi)^4D_{rt}^2D_{wt}^2D_{rw}^2} \quad (7)$$

$$(Case\ 4) \quad P_{ref} = \frac{\sigma_w\sigma_{tg1}\sigma_{tg2}F_{rt}^2F_{tw}^2G_tP_tG_r\lambda^2}{(4\pi)^5D_{rt}^4D_{wt}^4} \quad (8)$$

Table 3. Meanings of symbols in eq.(5) to eq.(8)

Symbol	Meanings
P_{ref}	The power of the reflected signal arriving at the radar[W]
P_t	Transmitted power[W]
G_t	Transmit antenna gain
G_r	Receive antenna gain(main beam)
G_{rs}	Receive antenna gain(side lobes)
σ_{tg}	The mono-static RCS of the target[m ²]
σ_w	The mono-static RCS of the wind turbine[m ²]
σ_{tg1}	The bi-static RCS of the target from radar to wind turbine[m ²]
σ_{tg2}	The bi-static RCS of the target from wind turbine to radar[m ²]
σ_{w1}	The bi-static RCS of the wind turbine from radar to target[m ²]
σ_{w2}	The bi-static RCS of the wind turbine from target to radar[m ²]
$F_{rw} = F_{wr}$	Terrain induced attenuation factor between radar and wind turbine
$F_{wt} = F_{tw}$	Terrain induced attenuation factor between wind turbine and target
$F_{rt} = F_{tr}$	Terrain induced attenuation factor between radar and target
D_{rw}	Distance radar to wind turbine[m]
D_{wt}	Distance target to wind turbine[m]
D_{rt}	Distance radar to target[m]

Case 1, Case 2는 소형 선박이 해상풍력 발전단지 안에 있는 경우로, Fig. 6는 레이더와 풍력발전기 간의 거리를 500 m부터 5,000 m까지 50 m 간격으로 늘리며 식 (5), 식 (6)을 계산한 결과이다. Main lobe 수신에 영향을 받는 Case 1에서는 레이더와 풍력발전기 사이의 거리가 3,050 m 이상부터 수신 전력이

임계값 -110 dBm 미만으로 레이더에 영향을 주지 않는다. Sidelobe 수신에 영향을 받는 Case 2에서는 모든 구간에서 수신 전력이 -110 dBm 미만이다.

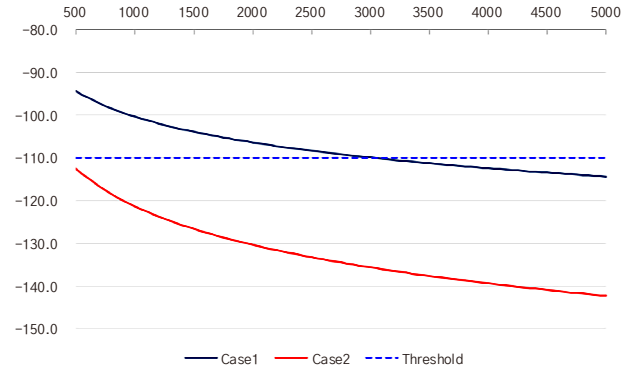


Fig. 6. Received power at Case 1 & Case 2

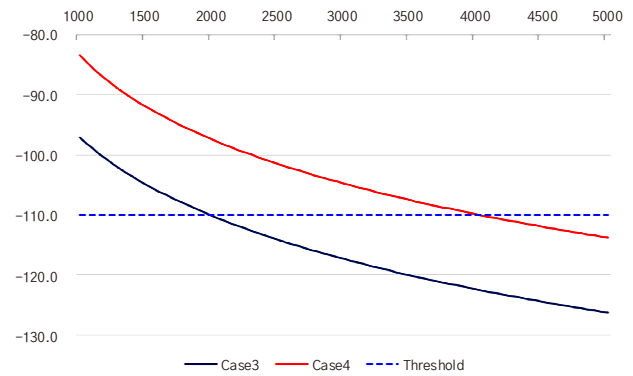


Fig. 7. Received power at Case 3 & Case 4

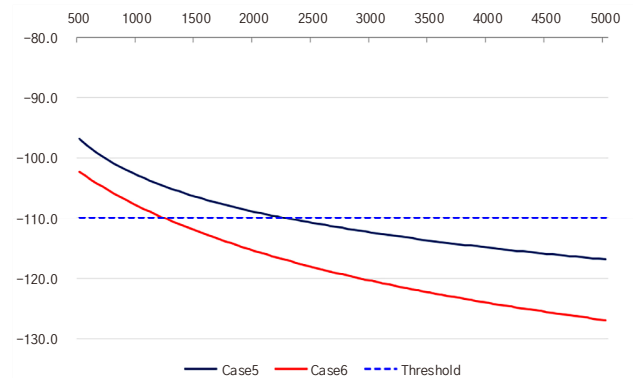


Fig. 8. Received power at Case 5 & Case 6

Case 3, Case 4는 대형 선박이 해상풍력 발전단지 외곽과 레이더 사이에 있는 경우로, Fig. 7은 레이더와 풍력발전기 간의 거리를 1,000 m부터 5,000 m까지 50 m 간격으로 늘리며 식 (7), 식 (8)을 계산한 결과이다. Sidelobe 수신에 영향을 받는 케이스인 Case

3에서는 레이더와 풍력발전기 사이의 거리가 2,000 m 이상부터 수신 전력이 -110 dBm 미만이다. Main lobe 수신에 영향을 받는 Case 4에서는 레이더와 풍력발전기 사이의 거리가 4,050 m 이상부터 수신 전력이 -110 dBm 미만이다.

Case 5, Case 6는 해상풍력 발전단지 내 풍력발전기 간 다중 반사 발생 케이스로, Fig. 8은 레이더와 풍력발전기 간의 거리를 500 m부터 5,000 m까지 50 m 간격으로 늘리며 식 (1), 식 (2)를 계산한 결과이다. Main lobe 수신에 영향을 받는 Case 5에서는 레이더와 풍력발전기 사이의 거리가 2,300 m 이상부터 수신 전력이 -110 dBm 미만이다. Sidelobe 수신에 영향을 받는 Case 6에서는 레이더와 풍력발전기 간의 거리가 1,250 m 이상부터 수신 전력이 -110 dBm 미만이다.

본 연구에서 설정한 레이더 성능 및 풍력발전기 특성을 반영하여 Case별 허위 표적 발생 가능성을 분석한 결과 레이더 허위 표적이 발생할 확률이 가장 높은 경우는 Case 4이며, 허위 표적 발생을 막기 위해서는 레이더와 풍력발전기 사이의 거리를 4,050 m 이상 떨어뜨려야 한다.

4. 결론

레이더 가까운 곳에서 발생하는 전파 간섭 요인은 원인을 파악하고 해결하는 것이 상대적으로 쉽지만, 멀리 떨어져 있고 RCS가 큰 다수의 대형 구조물에 의한 다중 반사 요인은 근본적인 문제 해결이 어렵기 때문에 레이더와의 거리를 둠으로써 문제를 해결하는 것이 합리적이다. 본 연구에서는 해외 연구 사례를 활용하여 해상에 설치되는 풍력발전기에 의한 다중 반사 경로로 발생할 수 있는 레이더 허위 표적 발생 가능성을 분석하였다. 보수적으로 분석하기 위해 레이더와 풍력발전기 특성을 최대한 가혹한 상황으로 설정하였으며, 분석 결과 레이더와 풍력발전단지 간의 거리가 약 4 km 이상이면 다중 반사에 의한 허상이 발생하지 않았다.

단, 실제 해상풍력 발전단지마다 분석 대상 레이더의 성능, 풍력발전단지 규모 및 풍력발전기의 특성이 다르기 때문에 해당 발전단지마다 관련 특성을 반영하여 분석하고, 레이더와 풍력발전단지 간 최소 이격 거리를 결정하는 것이 타당하다.

참고문헌

- [1] 한국에너지공단, '2025 글로벌 해상풍력 동향,' KEA 에너지 이슈브리핑, NO. 271, 2025.
- [2] 정준환, '해상풍력발전 동향,' 산은조사월보, NO. 821, KDB산업은행 미래전략연구소, 2024.
- [3] Liz Hartman, Wind Turbines: The Bigger, the Better, August 21, 2024.
<https://www.energy.gov/cmei/articles/wind-turbines-bigger-better> (accessed 2026.02.28.)
- [4] Office of the Director of Defense Research and Engineering, The Effect of Windmill Farms on Military Readiness 2006, Report to the Congressional Defense Committees, 2006.
- [5] BWEA Renewable Energy House, Investigation of Technical and Operational Effects on Marine Radar Close to Kentish Flats Offshore Wind Farm, BWEA, 2007.
- [6] EUROCONTROL Headquarters, EUROCONTROL Guidelines for Assessing the Potential Impact of Wind Turbines on Surveillance Sensors, EUROCONTROL-GUID-0130, EUROCONTROL, 2014.
- [7] Sung-Wook Ohn & Ho Namgung, 'Development of a Calculation Model for an Optimal Safe Distance Between Ship Routes and Offshore Wind Sites,' Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, VOL. 28, NO. 6, 2022, pp. 973-991.
- [8] United Nations Convention on the Law of the Sea, Article 60, Artificial Islands, Installations and Structures in the Exclusive Economic Zone, 1982.
- [9] Radartutorial.eu, Falcon II.
<https://www.radartutorial.eu/19.kartei/11.ancient4/karte066.en.html> (accessed 2026.02.28.)
- [10] Olatz Grande, Josune Cañizo, Itziar Angulo, David Jenn, Laith R. Danoon, David Guerra, & David de la Vega, 'Simplified Formulae for the Estimation of Offshore Wind Turbines Clutter on Marine Radars,' The Scientific World Journal, 2014.
- [11] B. M. Welsh & J. N. Link, 'Accuracy Criteria for Radar Cross Section Measurements of Targets Consisting of Multiple Independent Scatterers,' IEEE Transactions on Antennas and Propagation, VOL. 36, NO. 11, 1988, pp. 1587-1593.
- [12] Emmanuel Van Lil, Dave Trappeniers, Jan-willem De Bleser, & Antoine Van de Capelle, 'Computations of Radar Returns of Wind Turbines,' in proceedings of the 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, March 2009, pp. 3852-3856.
- [13] E. Van Lil, J.-w. De Bleser, D. Trappeniers, & A. Van de Capelle, 'Computation of False Echo Zones and Shadowing for Aeronautical and Weather Radars,' in proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, April 2010, pp. 1-5.
- [14] Itziar Angulo, Jon Montalban, Josune Canizo, Yiyuan Wu,

David de la Vega, & David Guerra, 'A Measurement-Based Multipath Channel Model for Signal Propagation in Presence of Wind Farms in the UHF Band,' IEEE Transactions on Communications, VOL. 61, NO. 11, 2013, pp. 4788-4798.

[15] IALA, G-1111-3 Producing Requirements for Radar (1st

ed.), International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, 2022.

[16] Alan Bole, Bill Dineley, & Alan Wall, 'The Radar System-Technical Principles,' in Radar and ARPA Manual (3rd ed.), Butterworth-Heinemann, 2014.