

서남해 해상풍력실증단지에서 X-Band Radar로 관측한 유동 및 파랑 자료 검증

최승삼* · 임은표** · 이형래** · 문광석** · 전인성*** · 김민석***

Verification of current and wave data observed with X-band radar
at an offshore wind substantiation farm in the Southwest Sea

Seung-Sam Choi*, Eun-Pyo Lim**, Hyung-Rae Lee**, Kwang-Seok Moon**,
In-Sung Jeon*** and MINSEUK KIM***

Key Words : Wave (파랑), Surface current (표층유동), X-Band Radar, ADCP (음향 도플러 유속계), Verification (검증), offshore wind farm (해상풍력단지), Linear regression analysis (선형 회귀 분석)

ABSTRACT

In order to respond to environmental changes and various events in the nearby sea area due to the operation of an offshore wind substantiation farm in the Southwest Sea, X-band radar has been installed and operated on a fixed platform since 2018. The X-band radar's monitoring system produces wave and current data through Rutter's Ocean WaveS wave and current (Sigma S6 WaMoS II). In this study, to verify the reliability of the produced data, the accuracy of current and wave data was evaluated by analyzing the correlation with the results obtained by an acoustic doppler current profiler (ADCP). The selected analysis period was a total of 30 days from November 29 to December 28, 2021, the period during which the ADCP survey was conducted. As a result of comparative verification, the current, wave height and peak wave period ($H_s > 0.69$ m) data observed from the X-band radar showed a high correlation with the results investigated from ADCP. In the future, current and wave data produced by X-band radar are expected to be used as basic data to analyze environmental changes in sea areas and provide information on various events.

1. 서론

서남해 해상풍력 실증단지는 국가 전략사업으로 추

진 중인 국내 첫 대규모 해상풍력 사업으로 1단계에서는 전라북도 고창 및 부안군 해역에 60 MW 용량의 해상풍력단지를 구축 하였다. 서남해 해상풍력 실증단지는 고창군 해안으로부터 10.2 km 떨어진 전라북도 부안군 및 고창군 해역 일원에 위치하며 면적은 7.7 km² 다. 대규모 해상풍력단지 건설에 따른 다양한 인공 구조물들은 파랑과 유속 등 인근 해역 환경의 변화를 초래할 수 있고 변화된 해수유동은 부유사의 이동을 수반하여 침식이나 퇴적에 의해 해저지형의 변형을 일으키게 된다. 이러한 환경변화를 정확하게 이해하기 위해서는 파랑과 유동에 대한 장기간의 모니터링이 필

* (주)세광종합기술단, 해양사업부(교신저자)

** (주)세광종합기술단, 해양사업부

*** 한국전력공사 전력연구원 융복합연구소

E-mail : css1628@gmail.com

DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2024.15.1.003>

Received : October 24, 2023, Revised : February 7, 2024

Accepted : February 8, 2024

요하다. 지금까지 해양자료를 취득하기 위해 관측용 부이(buoy)의 설치 또는 바닥에 센서를 계류하는 모니터링 방식을 이용하여 왔다. 이러한 방식은 한 지점에 대해 자료를 연속적으로 취득하기 때문에, 해당 지점에 대하여 정확도 높은 자료를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 수중이나 해수면에 설치되는 부이 또는 바닥에 계류되는 센서는 거친 해양환경에 견뎌야 하는 어려움이 있었다. 또한, 설치 과정에서의 설비 충돌, 운영 과정에서의 부작생물 노출과 염분에 의한 부식 발생으로 장비 손상이 빈번히 발생하고 있으며, 이를 유지·보수하기 위한 인력이 소요됨과 동시에 작업자는 항상 사고위험에 노출되어 있었다. 하지만 레이더에 의한 원격탐사는 이러한 현장 관측의 단점을 극복할 대안이 되고 있다. Radar는 센서를 이용한 포인트 관측과는 달리 광역에 대한 폭넓은 정보를 제공할 수 있다. X-Band Radar는 시·공간의 제약이 상대적으로 적으며 보다 저렴한 비용으로 광역의 해양에 대한 정확한 해수유동과 파랑 정보를 취득할 수 있다.

연구해역에서 사용된 안테나는 Furuno FAR-2127 이며, X-Band Radar의 대한 제원은 Table 1과 같다.

서남해 해상풍력 실증단지에서는 X-Band Radar를 단지 인근에 시범 설치하여 2018년부터 운영하고 있다. X-band Radar는 해상풍력 실증단지 외곽을 기점으로 서쪽으로 1.7 km 에 위치한 다목적 해상플랫폼에 설치되었고 플랫폼 상부 Deck의 높이는 조위 기준면 (datum level)으로부터 19.12 m 에 이른다.

S.Rikka(2019)은 X-Band Radar를 사용하여 핀란드 만 Tallinn Bay에서 파고를 직접 추정하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 레이더에서 파생된 유의파고(H_s)와

부이에서 측정된 H_s 를 비교하였을 때 상관계수가 0.78, RMSE는 0.23 m 으로 높은 일치도가 나타났으며, 또한 $H_s > 0.5$ m 인 경우 상관 관계가 더 높아졌고(0.93 이상) RMSE가 0.15–0.21 m로 낮아졌다[1]. Katrin Hessner(2014)는 뉴질랜드의 북섬에서 관측된 X-Band Radar 자료와 RiCOM 수치모델에서 예측한 조류자료 비교 결과 일치하는 결과를 나타냈다[2]. S.Rikka(2019)은 유의파고를 비교하였으며, Katrin Hessner(2014)는 RiCOM 수치모델자료와 비교를 통해 X-Band Radar 자료를 검증하였다. Friedman(2014)은 네덜란드 Sand Engine에서 X-Band Radar 깊이 추정 모델인 XMFit 을 개발하여 근해 수심 측량과 유체 역학 추정을 위한 향상된 방법을 제시하였다. 이 연구에서는 XMFit의 검증 임계값을 제시하여, 유의 파고가 1 m 이상, 풍속이 12 m/s 이상이어야 하며 바람과 파도가 45 ° 이내로 정렬되어야 높은 정확도가 보이는 것을 확인하였다[3]. Hessner(2017)은 독일 극지 연구 선박 Polarstern에서 2015–2016년 ANT-XXXI 탐험 중 획득된 X-Band Radar WaMoSII 표층 유동과 지하 (20–50 m 수심) ADCP 유동 관측을 비교하였다. 수직적으로 유동이 균일한 조건에서, WaMoS II와 ADCP의 상관관계는 $r > 0.9$ 정도의 높은 일치도를 보여주었으며, WaMoSII의 표면 유동 측정의 일반적인 정밀도를 검증하였다[4].

이처럼 선행 연구에서는 특정 조건 하에서 X-Band Radar로 관측된 유동 및 파랑 자료가 상당히 일치하는 것으로 확인되었다.

본 연구대상지인 서남해 해상풍력단지 인근 해역은 황해 남서측 해역으로 해수유동 에너지의 대부분이 조류에 의해 발생되며 황해 전체의 조석과 전파 구조에 의해 조석이 남쪽에서 북쪽으로 전파한다[5–6]. 조석형태는 반일주조 형이고, 몬순의 영향으로 동계에는 담수유입이 현저히 감소하고 강한 북서풍이 탁월하며, 하계에는 집중강우가 빈번하고 남풍이 우세하다. 이러한 바람의 변화는 연안수의 거동과 해수특성 분포에 큰 영향을 준다[7].

위와 같은 특징을 갖는 해역인 서남해 해상풍력단지 인근의 해상 중심에 위치한 고정 플랫폼에서 X-Band Radar로 관측된 유동 및 파랑의 정확도를 평가하고자 한다.

2. 자료 및 방법

Table 1 Furuno FAR-2127 Specifications

Description	Value
Radiator Type	XN-24AF
Pulse length	70 ns
Antenna length	8 ft
Output power	25 kW
Radar setup height	15 m
Depth constant	12 m

X-Band Radar는 위성 원격 감지 기술과 같이 파랑이나 해류 측정을 위해 2.4 초마다 3-5 km 영역의 해 표면을 스캔하며, 스캔된 이미지는 다양한 조건 하에서의 해상 클러터(sea clutter)를 관측한다. 항해 목적에 방해가 되어 소음 신호로 간주되었던 해상 클러터는 해수면의 공간적, 시간적 정보가 포함된 것으로 나타났다[8]. Bragg 이론에 따르면, 해상 클러터는 레이더 전자기 파장의 절반에 해당하는 짧은 해수면 파장에서 공명현상으로 인해 후방산란이 강화된다[9]. X-Band Radar에서 관측된 자료는 파장에 따라 약 2-8 m 깊이까지의 해양 상부를 대표하는데 파랑의 파장이 길수록 대표하는 깊이가 증가한다[10].

다목적 해상플랫폼 상부에 설치된 X-Band Radar는 X-Band 대역(8-12 GHz)의 주파수를 사용하여 광역적인 파랑과 유동 및 수심을 관측하는 모니터링 시스템으로 관측반경은 최대 4 km 정도이고 풍속과 설치 높이에 따라 관측반경이 달라질 수 있으며, 해수면 레이더 영상을 분석하여 유의파고, 파주기 그리고 유속 등 다양한 정보를 얻을 수 있다[11-12]. X-Band Radar를 통해 파랑과 유속을 모니터링하는 시스템은 Rutter사의 Sigma S6 WaMoS II(이하 WaMoS II)를 통하여 생산한다. WaMoS II 레이더 시스템은 X-band 대역의 레이더를 사용하여 해양의 파랑장 및 유동장을 관측하는 모니터링 시스템이다. WaMoS II 레이더 시스템은 선박, 해상플랫폼 또는 연안에 설치되어 해수면의 유속과 유향뿐만 아니라 파향 및 파고의 측정이 가능하다. WaMoS II 레이더 시스템은 레이더상의 해상 클러터로 나타나는 전자기파의 해수면 후방산란에 의해 관측된 해상 클러터로부터 파랑 스펙트럼, 유속 및 유향을 측정하는 연산을 통해 파랑과 유동정보를 산출한다. 파랑에 대한 Radar 이미지의 품질은 파고, 풍속 및 풍향에 의해 결정된다.

일련의 레이더 영상으로부터 해양환경 정보를 얻기 위해서는 다음과 같은 단계의 연산 및 모델링이 수행된다.

- 이미지 변환(Image Transformation) : 전체 레이더 영상에서 1×2 km 정도의 분석대상 이미지를 추출한 후 극좌표를 직교좌표로 변환한다.
- 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transformation) : 연속되는 추출영상(sub image)로부터 이산 푸리에 변환을 통해 3차원 이미지 스펙트럼을 생성한다.
- 해수면 유속 결정(Surface current determination) : 해수면 유속은 3차원 이미지 스펙트럼에서의 파에

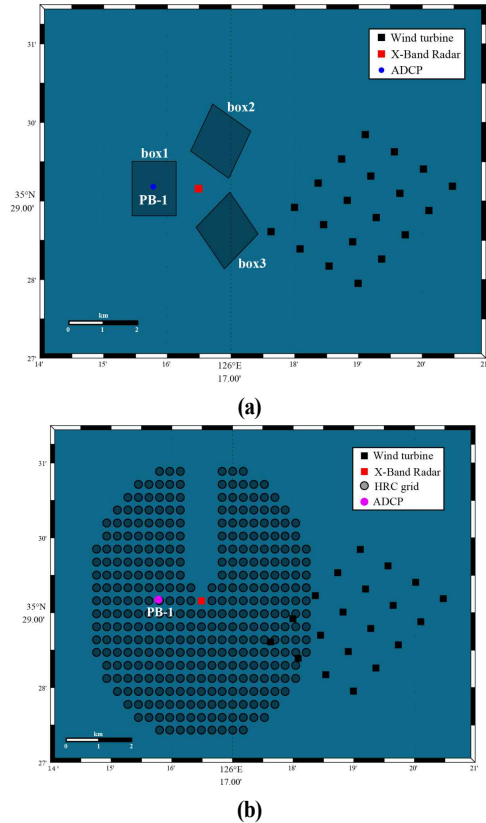


Fig. 1 (A) X-Band Radar wave data observation area (Box 1-3). PB-1 is installed in Box1 area (B) X-Band Radar current data observation grid

너지 위치와 선형 표면중력파(surface gravity waves)의 분산 관계식에서 주어지는 이론적 위치 사이의 최소거리 측정을 통해 얻어진다.

- 3D 이미지 스펙트럼 필터링(Filtering the 3D image spectrum) : band pass 필터를 사용하면 파랑에너지 영상으로부터 배경 노이즈를 제거한다.
- 2D 이미지 스펙트럼 결정(Determination of the 2D image spectrum) : 3D 이미지 스펙트럼을 플러스 주파수 영역에 배치하여 명확한 지향성의 2D 이미지 스펙트럼을 구한다.
- 2D 파랑 스펙트럼 결정(Determination of the 2D wave spectrum) : 3D 이미지 스펙트럼을 변조 전달 함수(modulation transfer function)를 사용하여 2D 파랑 스펙트럼을 구한다.
- 지향성의 파랑 스펙트럼 산정(Computation of the directional wave spectrum) : 2D 파랑스펙트럼의

파랑 수를 방향으로 표기하여 지향성을 갖는 파랑 스펙트럼을 산정함. 2D 파랑 스펙트럼으로부터 해수 유동의 주요 파라미터를 대부분 추출한다.

- 유의파고 추정(Estimation of the significant wave height) : 이미지로부터 파랑을 추출하는 비선형적 메커니즘으로 레이더 영상으로부터 직접 유의파고를 산정할 수 없으나 레이더로부터 취득되는 파랑장 내의 신호대 잡음비(SNR, Signal to Noise Ratio)를 이용하는 것으로 SNR은 관측되는 유의파고(H_s)와 아래 식과 같은 선형적인 관계가 있으며,

$$H_s = A + B\sqrt{SNR} \quad (1)$$

초기 파랑의 높이를 알기 위해서는 독립 설치된 현장의 파랑관측 센서나 수직해석 결과를 통해 식 (1)의 A와 B의 보정상수를 최소자승법을 통해 계산한다.

서남해 해상풍력 실증단지에서 운영하는 X-Band Radar는 1회 2.4초로 해수면을 관측하고 관측된 32개의 이미지를 활용하여 자료를 생성한다. WaMoS II의 파랑자료 분석은 1280 m × 1280 m의 BOX영역으로 계산되며, 각 BOX는 종합관측플랫폼을 기준으로 각도에 따라 관측영역을 나눠 BOX1 270°, BOX2 30°, BOX3 140°에 위치하고 있으며 플랫폼과의 거리는 650 m로 동일하다(Fig. 1, a).

WaMoS II의 HRC(High Resolution Current) 격자형 데이터는 분석영역 320 m × 320 m(21 × 21)의 매트릭스로 데이터 구성하며, 32개의 이미지 자료를 사용하여 데이터 생성하여 더 높은 해상도의 데이터를 제공한다(Fig. 1, b). 제공되는 X-Band Radar 데이터의 정확도는 유속 ±20 cm/s, 유향 ±2°, 유의파고 ±10%, 평균파향 ±2°의 오차를 가진다.

위와 같이 X-Band Radar로 관측된 유동 및 파랑의 검증은 위하여 Teledyne사 RDI ADCP Broadband 614.4 kHz를 Bottom mount 하여 측정된 자료와 비교하였다. ADCP의 설치수심은 1DL -10.8 m, cell size는 1 m 이고 3.1 m 부터 관측을 실시하였으며, 10분 간격으로 관측하였다. 이 기기의 대표적 정확도는 관측된 유속의 ±3%이다. 분석기간은 2021년 11월 29일부터 12월 28일까지이며, ADCP 관측자료는 상부 20%($H_{2/10}$)에 해당되는 수심의 자료를 표층으로 계산하였다. ADCP는 한 지점의 일정 깊이에서 측정된 유속이지만 X-Band Radar 유속은 일정한 반경 내의 표층 평균유동 속도이므로 측정방법의 차이로 인한 편차가

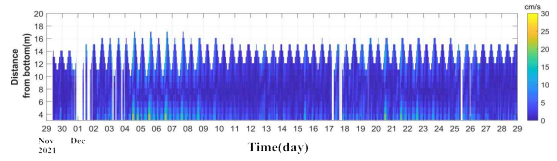


Fig. 2 The average speed and deviation of the entire water column from the ADCP at each hourly interval.

발생하나 11월은 밀도층이 수직으로 균질한 환경이기에 성층에 의한 영향이 적어 측정방법으로 인한 편차가 상대적으로 적게 나타난다. 수직적인 유속의 차이를 확인하기 위해 ADCP에서 관측된 유속을 전체 수심에 대하여 시간별로 평균하고, 평균된 값과 각 수심별 유속과의 편차를 계산하여 그 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 관측된 전 기간의 편차 평균값은 3.4 cm/s로 나타나 수직적으로 균질한 환경임을 확인하였다.

X-Band Radar와 ADCP로 측정된 유속을 비교할 때에는 먼저 대상 유속 차이를 줄이기 위하여 유동속도가 측정된 시각과 지점을 맞추어야 한다. 측정시각을 맞추기 위해 관측된 자료는 매 정시를 기준으로 30분 평균하여 1시간 간격으로 추출하였으며, 격자점에서 산출된 X-Band Radar 유속을 ADCP 계류지점의 유속으로 도출하기 위해 계류위치(PB-1)와 가장 근접한 지점의 자료를 사용하였다. 유동 자료는 RMSE와 선형회귀분석을 실시하여 X-Band Radar와 ADCP로 관측된 유속의 정확도를 확인하였으며, 파랑 자료는 파고, 파향, 파주기를 선형회귀분석을 진행하여 자료 간의 상관성을 평가하였다.

PB-1 정점에서 ADCP로 관측된 파랑자료의 신뢰성을 파악하기 위해 인근에 위치한 위도 파고부이(KMA), 부안 해양기상부이(KMA), 상왕등도 해양관측

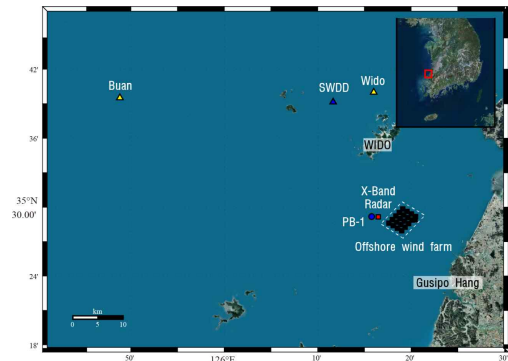


Fig. 3 A Location map of observation point

Table 2 Location map of observation point

station	Latitude(°N)	Longitude(°E)
X-Band Radar	35.4942	126.2122
ADCP(PB-1)	35.4864	126.2630
Wido	35.6584	126.2610
Buan	35.6586	125.8139
SWDD	35.6525	126.1942

부이(KHOA)에서 관측된 유의파고 및 최대파주기 자료와 동일기간 비교분석을 실시하였다. 각 비교점들과 ADCP(PB-1)와의 거리는 위도 18.80 km, 부안 40.42 km, 상왕등도 17.69 km 이다(Fig. 3, Table 2).

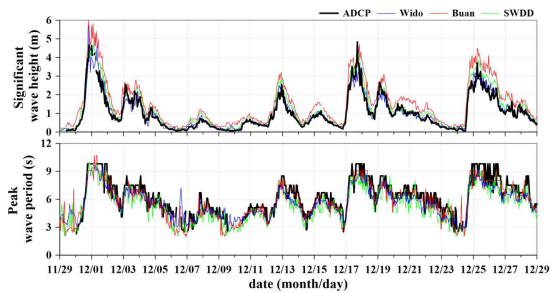


Fig. 4 The time series data of Significant wave height (upper) and Peak wave period (lower) observed by ADCP, along with Wido Buoy (KMA), Buan Buoy (KMA), and Sangwangdeungdo(SWDD) Buoy (KHOA).

회귀분석 결과, 유의파고는 위도 0.96, 부안 0.97, 상왕등도 0.97의 상관계수를 보였고 최대파주기는 위도 0.91, 부안 0.88 상왕등도 0.84로 높게 나타나 ADCP로

Table 3 The linear regression analysis results of significant wave height and peak wave period observed by Wido Wave Buoy (KMA), Buan Buoy (KMA), and Sangwangdeungdo(SWDD) Buoy (KHOA), along with the distance from ADCP measurements(PB-1)

	Name	Wido	Buan	SWDD
Hs	Slope	0.93	1.24	1.08
	Intercept	0.09	0.26	0.13
	Correlation	0.96	0.97	0.97
	RMSE(m)	0.25	0.62	0.33
Tp	Slope	0.73	0.84	0.81
	Intercept	1.16	0.70	0.42
	Correlation	0.91	0.88	0.84
	RMSE(s)	0.93	0.90	1.24
distance(km)		18.80	40.42	17.69

관측된 자료는 신뢰성과 일관성이 확보된 것으로 나타났다(Fig 4, Table 3).

3. X-Band Radar 자료 검증

3.1 유동자료 비교

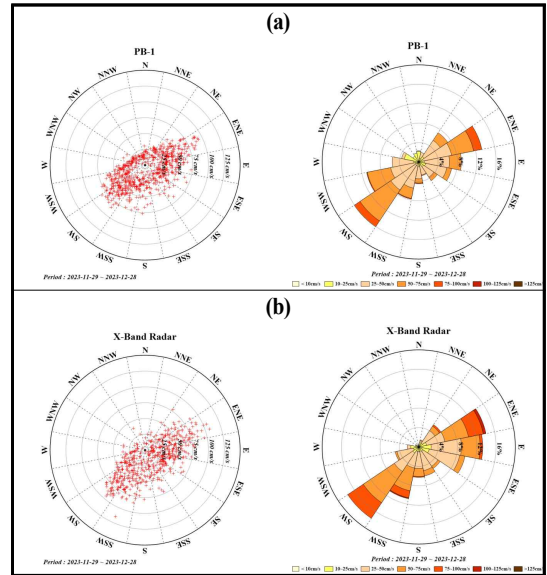


Fig. 5 Scatter plots and wind rose diagrams of current at the (a) ADCP(PB-1) and (b) X-Band Radar.

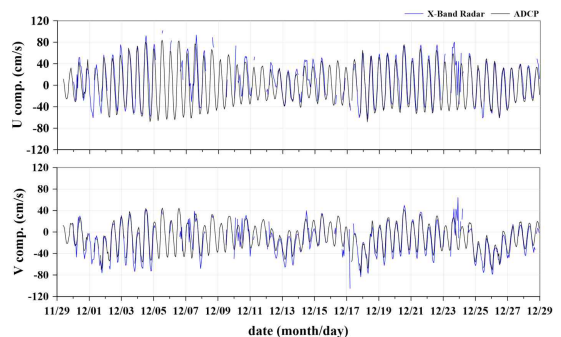


Fig. 6 Current data U component (top), V component (bottom) time series of ADCP(black) and X-Band Radar(blue).

ADCP(PB-1)와 X-Band Radar로 관측된 서남해 해상풍력 실증단지에서의 평균유속은 ADCP 40.55 cm/s, X-Band Radar 45.35 cm/s로 나타났다. 또한, 조류는 왕복성이 우세하며, 창조류는 동북동향으로 흐르고 낙조류는 남서향으로 흐르는 경향을 보였다(Fig. 5-6).

유동 자료의 RMSE는 동방성분 17.29 cm/s, 북방성분 13.10 cm/s 로 북방성분의 RMSE가 낮게 나타났으며, 두 유속 모두 X-Band Radar의 관측유속 정확도인 ± 20 cm/s 보다 작게 나타났다. Friedman(2014)은 상대적으로 얕은 10 m 미만의 수심이 분포하는 네덜란드 Sand Engine 인근에서 10일간 조류검증을 실시하였고 X-Band Radar와 ADCP 유속의 RMSE가 17 cm/s 로 나타나 본 연구와 유사한 결과를 보였다[3].

선형회귀분석 결과, X-Band Radar와 ADCP 동·북방 유속 성분의 상관계수 값이 동방 0.91, 북방 0.89로 일치하는 결과를 보였으며, 동방성분의 기울기는 0.92, 북방성분의 기울기는 1.03으로 1에 가깝게 나타났다. ADCP는 한 지점의 일정 깊이에서 측정된 유속이고 X-Band Radar는 일정한 반경 내의 표층 평균 유동 속도라는 차이에도 불구하고 높은 상관성을 보였다.

X-Band Radar에서 제공되는 Quality number 중 Gtot(Total Gain)는 후방산란강도를 나타내며 0-255의 값을 가진다. 해수면에서 충분한 후방산란강도가 나타나려면 2-3 m/s 의 풍속이 필요하며[13], 풍속이 강하게 나타날 때 후방산란강도가 높아지고 자료의 획득률이 높게 나타났다(Fig 8). 이러한 이유로 2021년 11월 29일부터 12월 28일까지 측정된 데이터 711개 중 524개의 데이터를 비교분석에 사용되었다. 유동 자료는 후방산란강도에 의해 자료의 수집률이 좌우되며, 충분한 후방산란강도가 나타나지 않았을 때 자료의 수집률이 저하되어 연속적인 자료의 분석에 활용하기에 한계가 있다(Fig. 7).

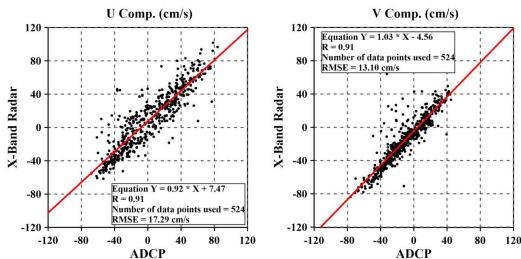


Fig. 7 Flow data U component (left) and V component (right) scatter plots of ADCP and X-Band Radar.

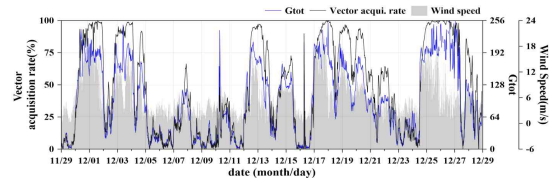


Fig. 8 Flow data collection rate(black) and Gtot(blue) and wind speed(gray area) time series.

3.2 파랑 자료 비교

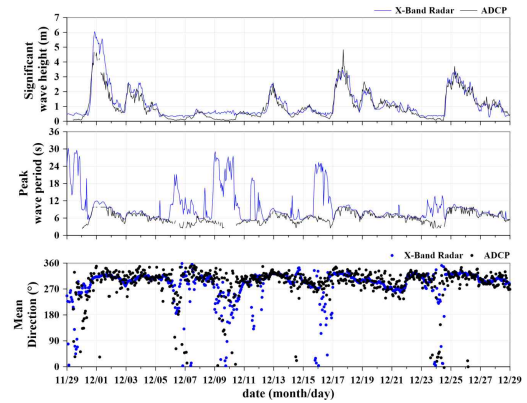


Fig. 9 Time series and scatter plot of significant wave height, peak wave period, and mean wave direction observed from ADCP(black) and X-Band Radar(blue).

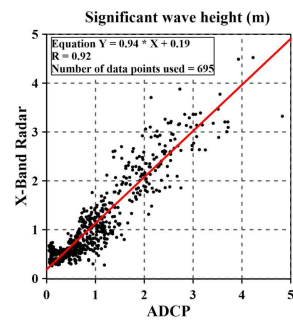


Fig. 10 Significant wave height scatter plots of ADCP and X-Band Radar.

관측된 유의파고, 평균 파향, 최대파주기는 Fig 9와 같으며 X-Band Radar는 파랑색, ADCP는 검정색으로 도시하였다. 파랑 자료는 유의파고, 평균 파향, 최대파주

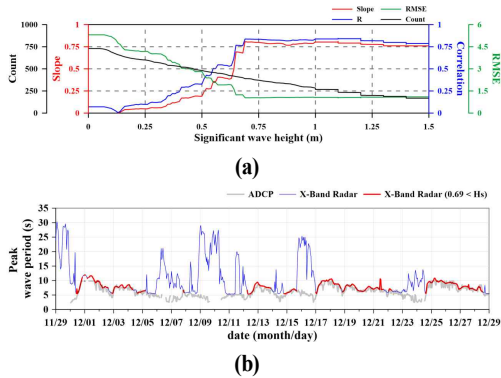


Fig. 11 (a) Peak wave period values corresponding to the significant wave height of ADCP are removed step by step starting from the lowest value, and the data resulting from the linear regression analysis of the removed wave period are shown for each significant wave height. (b) represents ADCP (black), X-Band Radar (blue), and the time series of the peak wave period for X-Band Radar corresponding to significant wave heights exceeding 0.69 (red).

기 성분을 각각 선형회귀분석 하여 자료를 비교하였다. 파고의 상관계수는 0.92로 높게 나타났으며, 기울기는 0.94로 1에 가깝게 나타났다(Fig. 10). 서로 다른 관측장비에서 관측된 파고는 시간에 따른 파고변화와 관계없이 비교적 일치하는 결과를 보였다. 평균파향과 최대파주기의 상관계수는 각각 0.26, 0.07로 낮은 값을 보였다. Fig. 9에서 파고가 낮게 나타났을 때 파향과 파주기의 값에 변동이 있는 것을 보였으며, 이를 확인하기 위하여 파향과 파주기를 ADCP의 유의파고를 기준으로 낮은 값부터 단계별로 제거한 후 선형회귀분석을 실시하여 상관계수를 도시하였다(Fig. 11-b, Fig. 12-c).

최대파주기의 상관계수는 ADCP에서 관측된 유의파고를 기준으로 0.69 m 이하에 해당하는 최대파주기를 제거하였을 때, 자료의 개수는 729개에서 390개로 감소하고 상관계수 0.84, 기울기 0.81, 절편 0.90, RMSE 1.03 으로 높은 일치도를 보였다(Fig. 11-a). Fig11-b의 붉은색 선은 ADCP에서 관측된 유의파고가 0.69 m를 초과하였을 때를 도시하였으며, 유의파고가 0.69 m를 초과해야만 최대파주기 성분에 대한 결과가 높은 일치도를 보이며, 신뢰성이 부여되는 것을 확인할 수 있었다.

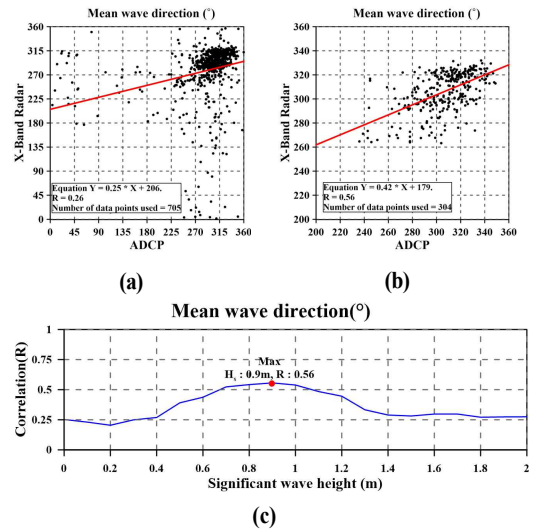


Fig. 12 (a) Mean wave direction scatter plot of ADCP and X-Band Radar. (b) Scatter plot with wave direction values corresponding to ADCP significant wave heights of 0.7 m or less removed. (c) Mean wave direction values corresponding to the significant wave height of ADCP are removed step by step starting from the lowest value, and the correlation coefficient of data resulting from the linear regression analysis of the removed wave direction are shown for each significant wave height.

X-Band Radar와 ADCP로 관측한 파향은 270-360° 사이의 북서향 파고가 ADCP(89.0%), X-Band Radar(73.1%)로 우세하게 나타났다. 파향의 상관계수는 ADCP에서 관측된 유의파고를 기준으로 0.9 m 이하의 파향 성분을 제거하였을 때, 상관계수 0.56으로 가장 높은 값을 보였으며 자료의 개수는 705에서 304로 감소하였다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 X-Band Radar 관측자료의 보다 효율적인 이용과 정확한 관측자료 제공을 위해 자료의 품질을 평가하였다.

연구에 사용한 기간은 2021년 11월 29일부터 12월 28일까지이며, 유동 자료의 RMSE는 동방성분 17.29 cm/s, 북방성분 13.10 cm/s로 X-Band Radar의 관측 유속 정확도인 ± 20 cm/s보다 낮게 나타났다. 선형회귀분석의 상관계수는 동방성분 0.91, 북방성분 0.89로 일

치하는 결과를 보였고 기울기는 동방성분 0.92, 북방성분 1.03으로 1에 가깝게 나타났다. 수집률의 경우, X-Band Radar의 비교관측 지점에서 74 %로 나타났다. 해수면에서 충분한 후방산란을 얻으려면 2-3 m/s의 풍속이 필요하며 후방산란강도가 충분하지 않았을 때 자료의 수집률은 저하되고 자료의 연속성이 떨어지게 된다.

겨울철에 관측된 유동 자료는 낮은 일사량과 강한 바람으로 성층화되지 않은 균질한 해양환경에 의해 두 관측장비의 관측수심, 관측반경의 차이가 있음에도 불구하고 높은 상관성을 보였다. 여름철 높은 일사량과 상대적으로 약한 바람이 나타났을 때 X-Band Radar의 관측 한계에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

파랑 자료는 파고, 파향, 파주기 성분을 각각 선형회귀 분석하여 자료를 비교하였으며, 파고의 상관계수는 0.92, 기울기는 0.94로 1에 가깝게 나타나 상당히 일치하는 결과를 보였다. 파향의 경우, 상관계수는 0.26으로 나타났으며 ADCP에서 관측된 유의파고 중 0.9 m 이하의 값에 해당하는 파향 값을 제거하고 선형회귀분석을 실시하였을 때 상관계수는 0.56으로 0.30만큼 상승 하였지만, 파향의 자료는 신뢰도가 높지 않은 것으로 나타났다.

ADCP와 X-Band Radar 최대파주기의 상관계수는 0.07으로 낮게 나타났으나 ADCP에서 관측된 유의파고 중 0.69 m이하에 해당하는 최대파주기를 제거하였을 때 상관계수가 0.84로 일치하는 결과를 보인다. 유의파고가 0.69 m를 초과하였을 때 자료의 신뢰성이 확보되는 것으로 나타났다.

X-Band Radar는 시공간의 제약을 비교적 받지 않고 적은 비용으로 광역의 해양에 대한 정확한 해양 정보취득이 용이하며, 해외 선진국을 중심으로 레이더 시스템, 무선통신 및 신호처리 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 레이더 원격탐사는 점차 신속한 대응 능력을 요구하는 기상이나 해양분야에서 필수적인 요소가 되고 있어 서남해 해상풍력 실증단지 환경모니터링에 X-Band Radar 시스템을 선제적으로 적용하여 구축경험과 운영기술을 축적하는 것은 매우 중요한 일이라고 할 수 있다.

설치된 X-Band Radar에서 측정된 유동 자료와 파랑 자료는 의미미한 결과를 보였으며 앞으로 서남해풍력단지 해역 내의 정보취득을 통해 장기간의 환경변화를 분석하고 다양한 이벤트에 정보를 제공할 수 있는 기초자료로 사용될 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No. 20203030020080, 해상풍력 단지 해양공간 환경 영향 분석 및 데이터베이스 구축)입니다.

참고문헌

- [1] S. Rikka, R. Uiboupin, T. Kōuts, K. Vahter, and S. Pärt, "A Method for Significant Wave Height Estimation From Circularly Polarized X-Band Coastal Marine Radar Images", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 16, Issue : 6, pp. 844-848, 2019
- [2] Katrin Hessner, Konstanze Reichert, Jose Carlos Nieto Borge, Craig L. Stevens & Murray J. Smith, "High-resolution X-Band radar measurements of currents, bathymetry and sea state in highly inhomogeneous coastal areas", *Ocean Dynamics*, vol. 64, pp. 989-998, 2014
- [3] J. Friedman, "Development of an X-Band Radar depth inversion model at the sand motor", Master's thesis, TU Delft, the Netherlands, 2014.
- [4] K. Hessner, S. E. Nagggar, V. Strass, S. Krägefsky, H. Witte, "Evaluation of X-band MR surface and ADCP subsurface currents obtained onboard the German research vessel Polarstern during ANT-XXXI expedition 2015/16" *OCEANS 2017 - Anchorage*, 2017.
- [5] Choi. B. H., "A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea", Korea Ocean Research and Development Institute(KORDI) Report, Vol 80-02, pp72, 1980.
- [6] Lee. S. H. and Beardsley, R. C., "Influence of stratification on residual tidal currents in the Yellow Sea", *J. Geophys. Res.*, Vol 104, pp15679-15701, 1999.
- [7] Bowden, K.F., "Physical Oceanography of Coastal Waters", Ellis Horwood Limited, pp302, 1983.
- [8] W. R. Alpers, D. B. Ross and C. L. Rufenach, "On the detectability of ocean surface waves by

- real and synthetic aperture radar," J. Geophys. Res., vol. 86, no. C7, pp. 6481-6498, 1981.
- [9] P. Lee, J. Barter, K. Beach and C. Hindman, "X-Band microwave backscattering from ocean waves," J. Geophys. Res., vol. 100, no. C2, pp. 2591-2611, 1995.
- [10] B. Lund, H. C. Tamura, C. O. Collins and M. C. Varlamov, "A new Technique for the retrieval of nearsurface vertical current shear from marine X-band radar images" J. Geophys. Res., Vol. 120, no.12, pp.8466-8486, 2015.
- [11] W. Alpers, K. Hasselmann, "Spectral signal to clutter and thermal noise properties of ocean wave imaging synthetic aperture radars" International Journal of Remote Sensing, Vol. 3, pp.423-446, 1982.
- [12] J. Nieto Borge, G. Rodriguez, K. Hessner, and P. Gonzalez, "Inversion of marine radar images for surface wave analysis," Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004.
- [13] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill, pp. 474 - 482, 1980.
- [14] R. Gangeskar, "Verifying High-Accuracy Ocean Surface Current Measurements by X-Band Radar for Fixed and Moving Installations" IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 56, Issue: 8, pp.4845-4855, 2018.
- [15] A. J. Weijnenborg, "Validation of X-band radar-derived current measurements at the Sand Engine: The relation between spatial scale of wave dispersion analysis and accuracy," M.S. thesis, Dept. Hydraulic Eng., Delft Univ. Technol., Delft, The Netherlands, 2015.
- [16] T. Hilmer, E. Thornhill, "Deterministic Wave Predictions from the WaMoS II", OCEANS 2014 - TAIPEI, 2014.