

제주 남부 HF Radar 표층해류 관측 현황 및 향후계획 Current Status and Future Plans for Surface Current Observation by HF Radar in the Southern Jeju

정다운* · 김재엽** · 권재일*** · 송규민****

Dawoon Jung*, Jae Yeob Kim**, Jae-il Kwon*** and Kyu-Min Song****

요지 : 제주 남부 해협은 대마난류의 분기점으로써 한반도 해역 열염순환의 시작점이 되고 태풍, 쓰나미와 같은 해양 재해의 크기와 빈도에 영향을 미치며 유해생물이나 방사능 오염수가 들어오는 공급원이 되는 등 해양지리학적으로 매우 중요한 영향을 미친다. 따라서 이러한 해상재해 및 재난에 대하여 즉각적인 대응을 위해서는 준 실시간의 해양 관측이 필요하다. 그러나 다른 해협에 비하여 제주 남부의 경우 이러한 해상관측이 부족하며 이로 인해 연구 결과 또한 저조한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 제주 북부에서의 고주파 레이더 설치 경험을 활용하여 제주 남부에서 레이더 관측에 적합한 지역을 선정하고 고주파 레이더를 설치하여 관측을 진행하였다. 이를 통해 제주 남부 해협의 광역 표층해류장을 신출하고 APM(Antenna Pattern Measurement)과 FOL(First Order Line)을 통한 후처리 및 자료 개선을 진행하였으며 이에 대해 실측자료를 활용한 비교분석을 진행하였다. 그 결과 상관계수에서 0.4~0.7, RMSE(Root Mean Square Error) 약 1~19 cm/s의 개선 결과를 보였다. 이러한 고주파레이더 관측결과는 자료 개방 네트워크 구축을 통해 차후에 태풍 대응, 수치모델 검증, 광역 파랑자료의 활용, 해양 수색 구조와 같은 국내 현안 문제를 해결하는데 도움을 줄 것이다.

핵심용어 : 고주파 레이더, 안테나 전파보정, 스펙트럼 신호구분, 제주 남부 해역, 광역해류관측

Abstract : The southern strait of Jeju is a divergence point of the Tsushima Warm Current (TWC), and it is the starting point of the thermohaline circulation in the waters of the Korean Peninsula, affecting the size and frequency of marine disasters such as typhoons and tsunamis, and has a very important oceanographic impact, such as becoming a source of harmful organisms and radioactively contaminated water. Therefore, for an immediate response to these maritime disasters, real-time ocean observation is required. However, compared to other straits, in the case of southern Jeju, such wide area marine observations are insufficient. Therefore, in this study, surface current field of the southern strait of Jeju was calculated using High-Frequency radar (HF radar). the large surface current field is calculated, and post-processing and data improvement are carried out through APM (Antenna Pattern Measurement) and FOL (First Order Line), and comparative analysis is conducted using actual data. As a result, the correlation shows improvement of 0.4~0.7 and RMSE of about 1~19 cm/s. These high-frequency radar observation results will help solve domestic issues such as response to typhoons, verification of numerical models, utilization of wide area wave data, and ocean search and rescue in the future through the establishment of an open data network.

Keywords : HF radar, antenna pattern measurement, first order line, southern Jeju strait, wide area current observation

1. 서 론

제주 남부해협은 쿠로시오 지류인 대마난류수가 대한해협으로 유입되고 그에 분지된 일부는 황해난류수(Yuan and Su,

1984)와 제주난류(Lie et al., 2000)로 나누어져 황해와 제주 해협에 열, 염을 공급하는 복잡하고 다양한 변화가 나타나는 곳으로 좋은 어장환경이 형성되는 조건이어서 조업 밀도가 높은 지역이며, 오트나 유람선과 같이 특수활동 선박을 이용한

*한국해양과학기술원 해양순환연구센터 무기계약직기술원(Full-time Research Specialist, Ocean Circulation Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

**한국해양과학기술원 해양순환연구센터 연수연구원(Post Master Scientist, Ocean Circulation Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

***한국해양과학기술원 해양재난·재해연구센터 책임연구원(Principal Research Scientist, Marine Disaster Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

****한국해양과학기술원 해양순환연구센터 선임연구원(Corresponding author: Kyu-Min Song, Senior Research Scientist, Ocean Circulation Research Center, KIOST, 385, Haeyang-ro, Yeongdo-gu, Busan Metropolitan City 49111, Korea, Tel: +82-51-664-3093, Fax: +82-51-403-4920, kmsong@kiost.ac.kr)

다양한 레저활동도 많은 해역이다. 이처럼 선박을 이용한 해양활동이 많아짐에 따라 해상사고가 빈번하게 일어나는 지역이기에(Cho et al., 2014) 해상사고를 방지하기 위하여 해류, 바람, 파고 등 해양정보의 체계적이고 지속적인 관측 및 연구가 필요한 곳이기도 하다.

기존의 제주남부 해류의 흐름에 대한 연구는 Lie and Cho (2016)가 1980년대부터 2000년대까지 황해와 동중국해 지역에 투하한 다수의 위성통신 뜰개로 계절에 상관없이 제주남부해협에는 대마난류로 합류하는 지속적인 흐름이 발생하며 황해난류수와 제주난류가 존재하는 복잡한 구조를 증명하였고, Cha and Moon(2010)은 고해상도 해양순환모델인 ROMS를 사용하여 제주 연안 및 주변해역의 계절별 해류 및 조류 분포를 파악하고 시·공간적인 해수유동 특징을 분석하였다. 하지만 이러한 연구는 제주 주변해역의 장기적인 해류 변동성에 관한 연구이며, 더욱이 타 해역보다 많지 않은 제주 주변 해역의 해류 자료로 해양 선박 또는 인명사고와 같이 해상사고 발생 시, 이동경로 파악과 피해 범위를 정확히 예측하기에는 한계를 지닌다.

제주 주변해역은 대마난류의 강한 흐름으로 인하여 투하된 표충뜰개들이 빠르게 제주해역을 빠져나가므로 장기적인 자료획득이 힘들고(Jeong et al., 2008) 잦은 어업활동으로 인하여 ADCP와 RCM과 같은 고정점 해류관측장비의 유실 위험이 높고, 조류가 강하여 장기적인 관측을 하기에는 쉽지 않은 해역으로(Oh et al., 2009; Jung et al., 2021) 지금까지 연속적인 해류관측자료가 부족하였다고 여겨진다. 하지만 제주 주변해역은 한반도 해양기후연구의 주요한 입지를 지니며, 양쯔강 연안수의 유입으로 인한 저염수의 영향과 모자반의 피해 등 해양의 현안문제가 지속적으로 발생하는 지역으로 장기적이며 광역적인 해양순환관측이 요구되는 해역임에 틀림 없다.

한국해양과학기술원에서는 제주 주변해역의 해류관측의 어려움을 극복하고 지속적이며, 광역적인 해류관측을 진행하고자 고주파(HF band)를 이용하여 해수면의 실시간 광역 유동장을 관측하는 장비인 해수면 관측레이더(HF radar)를 제주 북부연안에 구축하여 제주 북부 광역 표충해류 관측을 진행하고 있으며, 관측된 자료를 활용하여 해양순환연구, 관측자료품질 향상 연구, 예측자료의 검증 및 품질 고도화 연구 등 다양한 연구를 진행해오고 있다(Song et al., 2010; Oh et al., 2017; Choi et al., 2019; Oh et al., 2020; Song et al., 2022). 또한 상기 연구와 더불어 제주 주변해역의 관측 확장의 일환으로 2022년부터 제주 남부 광역 표충해류를 실시간 관측을 진행하고 있다.

본 연구에서는 한반도 주변 해역임에도 불구하고 상대적으로 해양관측 빈도가 낮은 제주 남부해역에 해수면 관측레이더의 설치 및 운영, 그리고 자료를 생산하는 과정 및 검증과 자료관리체계의 전반적인 관측 현황을 설명하고 향후 관측계획을 제시함으로써 향후 제주 주변해역의 해류연구와 지역 현

안문제 해결에 기여하고자 한다.

2. 제주 남부 해수면 관측레이더 구축

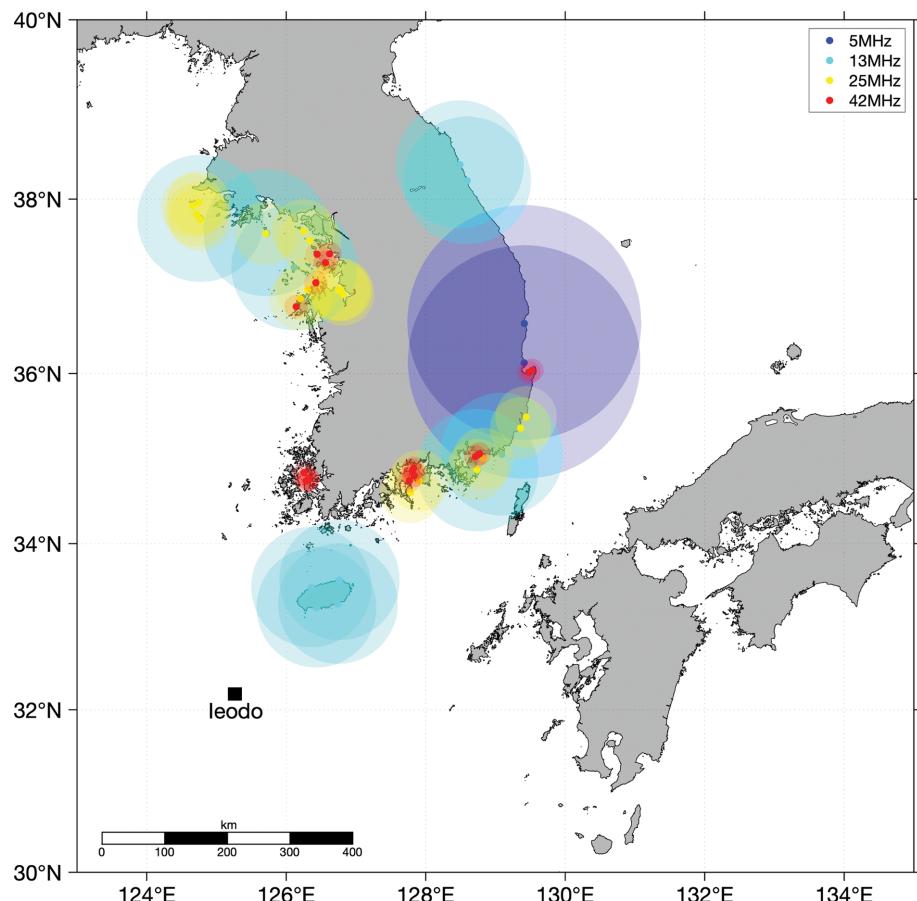
2.1 관측 지점 설정

본 연구에서 사용하고 있는 고주파 레이더는 CODAR사의 Seasonde HF radar로 관측 방향을 특정하지 않는 무지향성이며 관측지점을 중심으로 산출되는 병사형해류장의 중복되는 영역을 합성하여 표충해류 자료를 생산한다. CODAR HF radar는 송·수신기가 단일형태로 구성된 형태로 다른 해양레이더 제품에 비하여 설치, 이동, 운용 및 유지관리가 용이하므로 관측장비 설치공간이 부족한 국내 해안지역의 특성을 보완하기 때문에(Song et al., 2010) 국내 대부분의 고주파 레이더는 관측소에서 CODAR사의 Seasonde HF radar 제품을 사용하여 전국에 약 55기가 운용되고 있다(Fig. 1). 본 연구에서는 제주해협 표충해류 관측을 위해 이전에 설치되어 운용되고 있던 제주 북부의 2개 지점(제주시 신엄리, 김녕리)에 더하여 제주 남부 표충해류 관측을 위해 제주 남부 2개 지점에서 고주파 레이더를 설치하여 표충해류를 관측하고자 하였다.

고주파 레이더를 설치하기에 앞서 특정 주파수의 전파를 활용하여 관측하는 장비의 특성상 주변 환경에서 간접되는 잡음의 영향에 따라 관측 결과가 크게 바뀔 수 있으므로 이를 최소화 할 수 있는 설치 위치를 선정하는 것이 무엇보다 중요하다. 레이더 설치 위치의 이상적인 환경으로는 해안선과의 거리가 관측 파장의 최대 100~250 m 이내에 이격되어 설치할 수 있는 장소가 필요하며 안테나 주변에는 관측 전파에 잡음을 생성할 가능성이 있는 전도성 물체(금속막대, 전선, 차량 등)와 고충 시설물(전신주, 고충 건물 등)을 피하여 설치되어야 한다. 부득이하게 이러한 물체 및 시설 주변에 설치할 경우 영향을 최소화하기 위하여 시설 높이의 일정 거리 이상 관측 고도를 상승시키거나 위치를 이격시켜야 한다. 또한 레이더의 지속적인 관측을 위해서 관측소에서 안정적인 전기 공급이 가능하여야 하며, 실시간 모니터링을 위하여 네트워크 연결이 필요하므로 이러한 인프라가 갖추어져 있는 주변 환경에서 레이더 장비 설치가 필요하다. 또한 이상적 관측 환경을 가진 위치를 발견하였더라도 위치 대여를 위한 합법적인 행정 절차의 여부에 대해서도 고려하여야 한다. 전과 환경이 최상인 지역을 발견했다 하더라도 관광지인 제주 특성상 설치지점이 관광명소와 문화재로 지정된 경우들이 많다. 이러한 경우 장비 설치가 불가하거나 가능하더라도 복잡한 행정절차를 거쳐야 할 확률이 높다. 반대로 민간 지역의 경우 높은 토지대여료를 지불해야 하며 토지 소유주의 사정에 따라 지속관측이 불가능할 수도 있는 등의 변수가 발생한다. 또한 제주는 어업과 관광업이 발달하여 연안 지역 밀집도가 높으므로 연안에 설치된 레이더가 과손 및 훼손될 확률이 높다. 따라서 레이더 장비는 설치 환경, 행정 절차, 인구 밀집도 등

Table 1. Information of HF Radar in Southern Jeju

Station	Taeheung	Daepo
Longitude	126°44.436'E	126°24.014'E
Latitude	33°16.726'N	33°14.044'N
Observation period	2021.11~	2021.11~
Center frequency	13 MHz	13 MHz
Bandwidth	49.63 kHz	49.63 kHz
Observation distance (maximum)	70~80 km (90 km)	80~85 km (90 km)
Spatial resolution	3 km	3 km
Temporal resolution	Hourly	Hourly

**Fig. 1.** Locations of operating HF radar in KOREA.

다양한 변수를 고려하여 설치되어야 한다.

본 연구에서는 위성 지도를 통하여 제주 남부에서 지리적으로 레이더 설치가 가능한 14 곳을 선정한 뒤 현장답사를 통하여 주변 환경을 분석하였다. 현장 설치 및 지속 운영이 힘든 마라도와 가파도 5 지점을 제외하고 9 지점에서 설치 예상 지점에서의 관측 범위와 전파 환경을 분석하였다. 이 중 민간 소유 토지 및 공유 수면으로 토지 대여가 어렵거나 방파제로 인해 관측범위를 제한하는 5 지점을 제외하고 4개의 지점에서 관측 범위를 제한하는 육지 지형이 없고 전파 환경이 좋으며 토지 대여가 쉬운 대포동과 태홍리가 최종 설치 지역으로 선정되었다(Fig. 2). 위 두 지역은 이전에 해경 소대가 근무하던 막사가 위치한 지역으로 최근 무인 관측소로 변

경되었으며 해경에서 소유하는 토지로 민간인이 접근 불가한 지역이다. 또한 2층 건물이 존재하여 높은 고도에서 관측이 가능하게 설치할 수 있으며 막사주변에서 지속적인 전기와 통신 공급이 가능하다. 설치지점에서 관측 영역을 제한하는 방파제나 육상지형이 없으며 군·경 막사 특성상 외지에 존재하기 때문에 주변에 전파 방해물이 적어 잡음이 적은 전파환경을 지닌다. 최종 선정된 두 곳의 관측 상세내용은 Table 1과 같다.

2.2 자료 품질 개선 및 평가

관측 환경이 좋은 지점에 고주파 레이더를 설치했다 하더라도 관측 중 예기치 못한 전파잡음으로 인하여 관측 품질

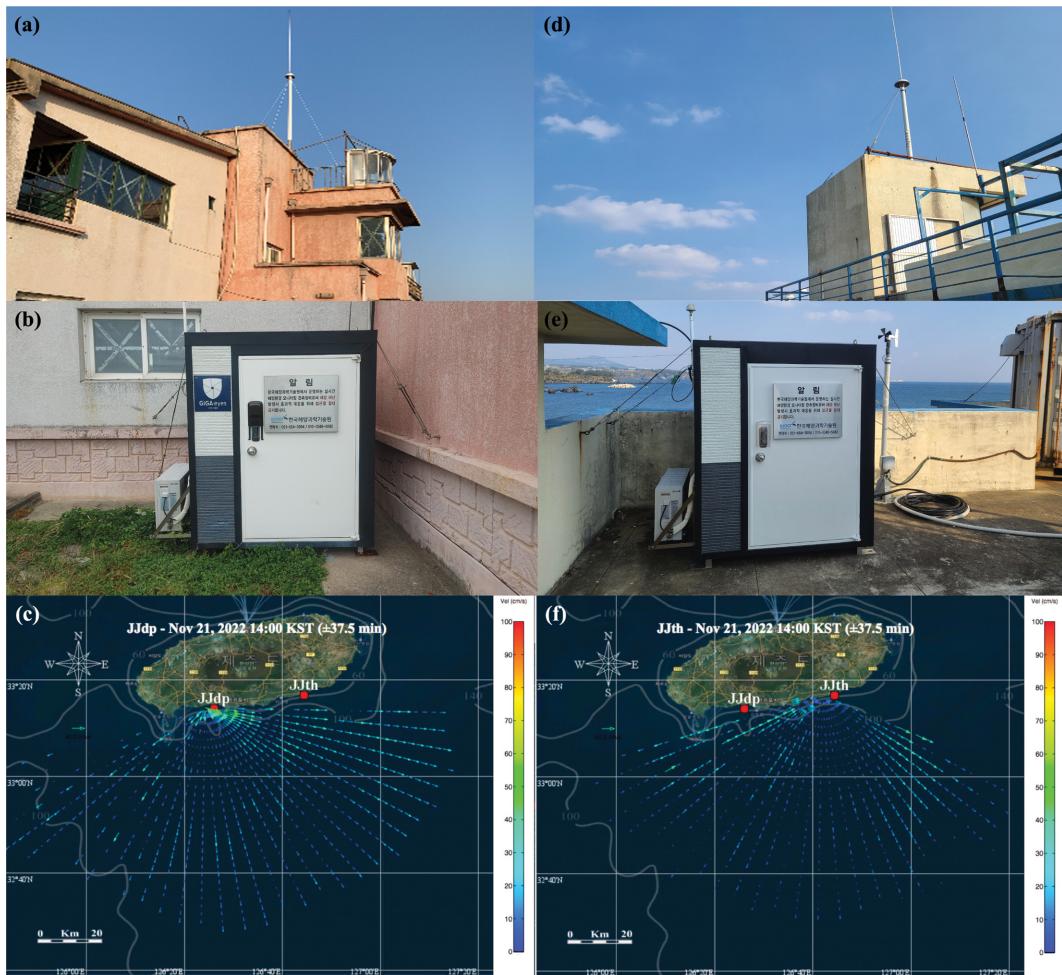


Fig. 2. Field-installed HF radar antenna and observatory in Taeheung (a, b, c) and Deapo (d, e, f).

Table 2. Variables used in antenna pattern measurement experiment

Location Name	Period (m/dd HH:MM)	APM Parameters		Phase Corrections
		Filter	Pattern	
JJth	4/19 15:30~	Radial Velocity > 1.0 m/s	Smoothing 30°	Loop1: -13.0°
	4/19 15:49	Signal Level > 10 dB		Loop2: -8.5°
JJdp	4/20 16:06~	Radial Velocity > 1.0 m/s	Interpolation 1°	Loop1: -73.4°
	4/20 16:33	Signal Level > 10 dB		Loop2: -81.5°

의 저하가 발생할 가능성이 있다. 따라서 이를 보정하기 위하여 CODAR사에서는 안테나 패턴 측정(Antenna Pattern Measurement, APM) 실험을 통한 전파보정 방법을 권장하고 있다. APM은 본 연구에서 사용되는 무지향성 안테나에 사용되는 방법으로 안테나로 수신되는 신호들에 대한 방향별 강도값(Signal strength)을 측정한 후 무지향성 신호로부터 위치를 추정하여 방사해류장을 합성할 시 발생하는 위상의 오류를 수정하는 것이다(Barrick and Lipa, 1986; Laws et al., 2010; Lai et al., 2017; Tian et al., 2019). 이러한 APM은 AIS, 도보, 선박, 드론 등을 활용하여 안테나를 중심으로 원을 그리면서 측정을 진행한다. 본 연구에서는 안테나를 중심으로 도보 APM을 수행하기 위한 육지공간이 충분하지 않았

기 때문에 선박 APM을 진행하였다. 선박 실험을 수행 후 패턴처리 프로그램에서의 환경에 적합한 인자 값을 적용하여 GPS 자료와 Time series 자료의 동기화, 선박 경로 가장자리 제거, 위상 보정, 낮은 신호 강도 값 구역 제거, 최대 유속 제한 및 보간을 통해 최종적인 패턴 자료를 생성하였다(Table 2; Fig. 4).

APM을 통한 관측 품질 보정에 더하여 해류 신호와 배경 잡음을 명확하게 구분하여 정확한 방사형 해류자료를 생산하기 위하여 스펙트럼 신호 구분(First Order Line, FOL)을 적용하였다(Fig. 4d). 스펙트럼 자료에서 주변 잡음, 해류 신호, 파랑 신호가 섞여서 기록되는데 여기서 신호 강도 값이 가장 큰 부분(First Peak)을 해류 신호, 그 다음으로 강한 값을(Second

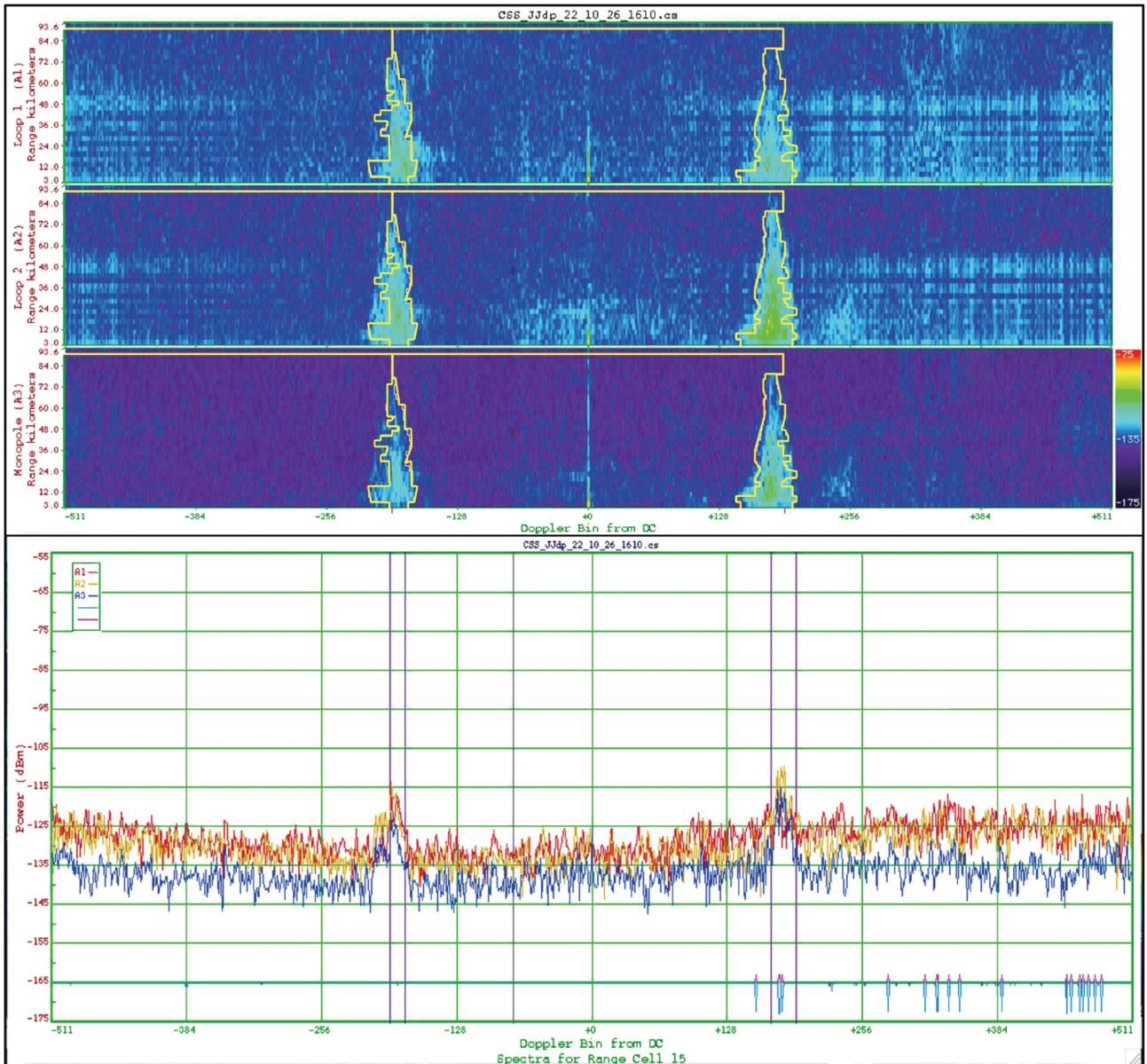


Fig. 3. FOL is set using factors for detailed filter input from spectral data. Top) FOL (solid Yellow line) in the entire spectrum Bottom) FOL (solid purple line) in the spectrum belonging to one cell with the same distance.

Peak) 파랑 신호 그리고 그 외부분을 잡음(noise) 신호로 처리한다(Lipa et al., 2019). 이 과정에서 First Peak와 Second Peak을 구분하는 경계선에 따라 추출되는 방사형 해류의 결과값이 달라지므로 이 경계선을 추출하는 과정이 매우 중요하다. 다양한 인자값 적용을 통하여 최적의 경계선을 설정하는 방법을 FOL이라고 한다. 스펙트럼 자료에서 FOL을 적용하면 Fig. 3과 같이 First Peak와 Second Peak를 구분하는 경계선이 설정되며 이 경계선 내부의 신호값을 해류로 판단하고 이를 이용하여 방사형 해류자료를 생성한다. 위상의 오류를 수정하는 APM과 달리 FOL은 신호 강도 값을 구분하는 변수를 설정하여 First Peak에 해당하는 해류와 Second Peak의 파랑을 정확하게 구별하는 역할을 하여 이를 통해 지역별 해류의 오차값을 최소화시키는 역할을 한다(Evans et

al., 2013; Kirincich, 2017; Lai et al., 2020).

2.3 표층뜰개를 활용한 비교검증 평가

보통 장기 관측이 가능한 고주파 레이더의 자료를 비교하는데 고정점 부이를 통한 오일러식 해류 비교분석이 높은 비율로 사용된다. 고정점 부이는 한 지점에서 1달 이상의 연속적인 관측이 가능하여 많은 양의 자료를 비교분석 할 수 있으며 조화분석을 통한 조석성분의 비교분석 또한 가능하다. 그러나 고정점 부이는 한 지점에 고정되어 있기 때문에 공간적인 제한이 있으며 일정한 수심(약 4 m 이하) 아래에서 해류를 관측하기 때문에 레이더가 관측하는 표층(수면하 약 1 m)의 해류 정보를 반영하기 어렵다. 그러므로 고주파레이더 해류의 광역적인 비교분석을 위해서는 표층뜰개를 활용한

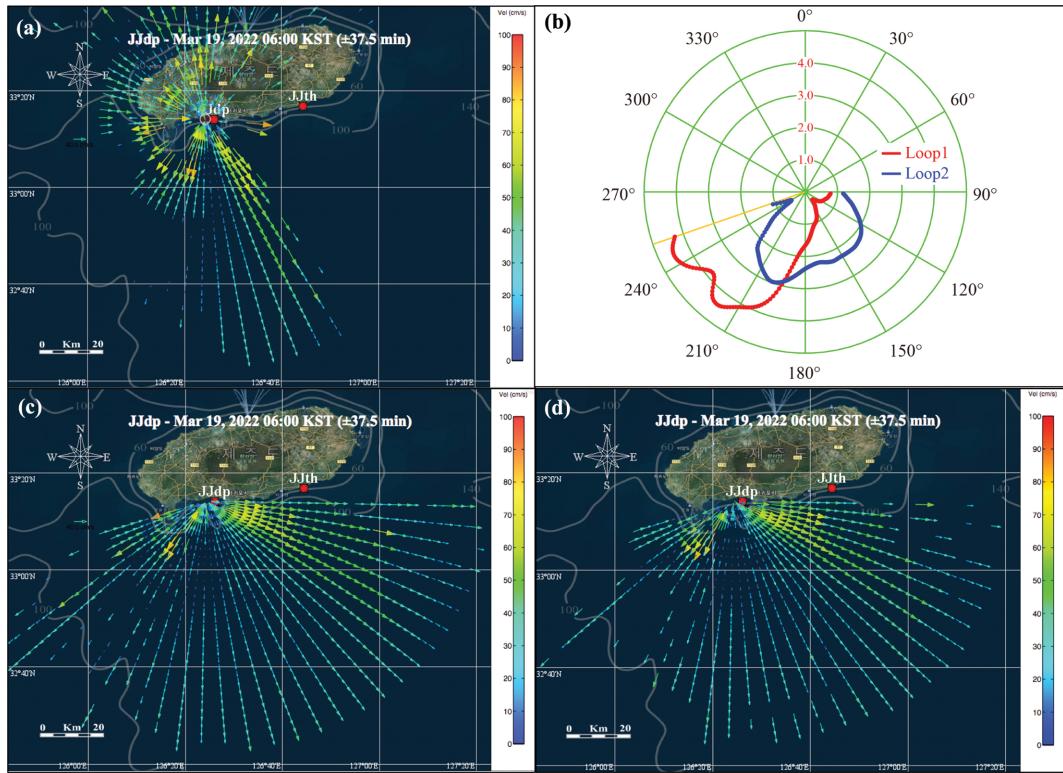


Fig. 4. Radial vector data observed at the Deapo HF radar site. a) Ideal. b) Antenna pattern. c) Measure. d) FOL.

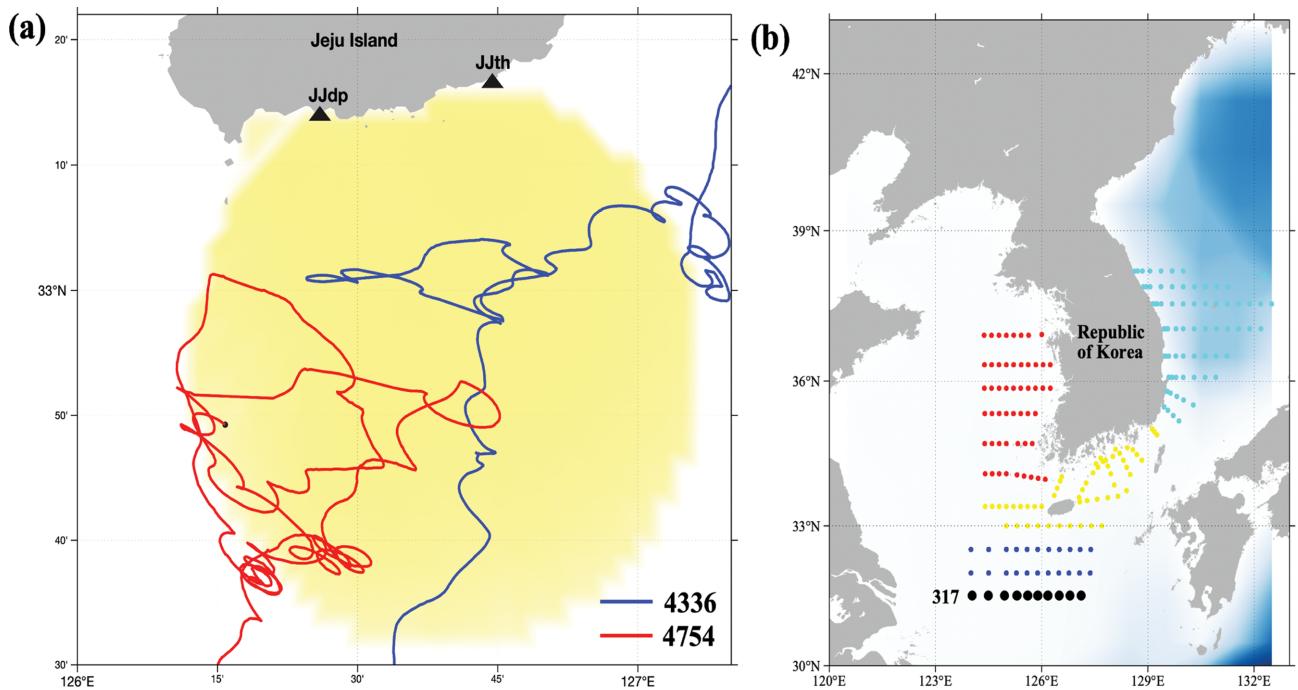


Fig. 5. (a) The drifter's path. It moved in the northeast direction within the observation area of the HF radar (yellow area) (b) CTD observation line of Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA). Line 317 is black dot.

라그랑지안식 비교분석이 사용된다. 위성통신 표층뜰개는 직접 해류를 따라 이동하며 위성통신을 통해 위치 정보를 전송 받아 이동경로 상의 해류에 대한 정보를 획득하여 지역별 표층해류를 비교 할 수 있다. 또한 고정 부이에 비하여 크기가 작아 장비 이동 및 투하가 간편하기 때문에 저비용으로도 실

험이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 표층뜰개는 해류를 따라 이동하기 때문에 고주파 레이더의 영역을 빠르게 빠져나가 비교자료 획득이 어려운 경우가 발생하며 이를 해결하기 위해서는 다양한 표층뜰개를 사용하여 공간적 보간이 필요하다(Jung et al., 2019). 그러므로 2가지의 표층해류 비교분석

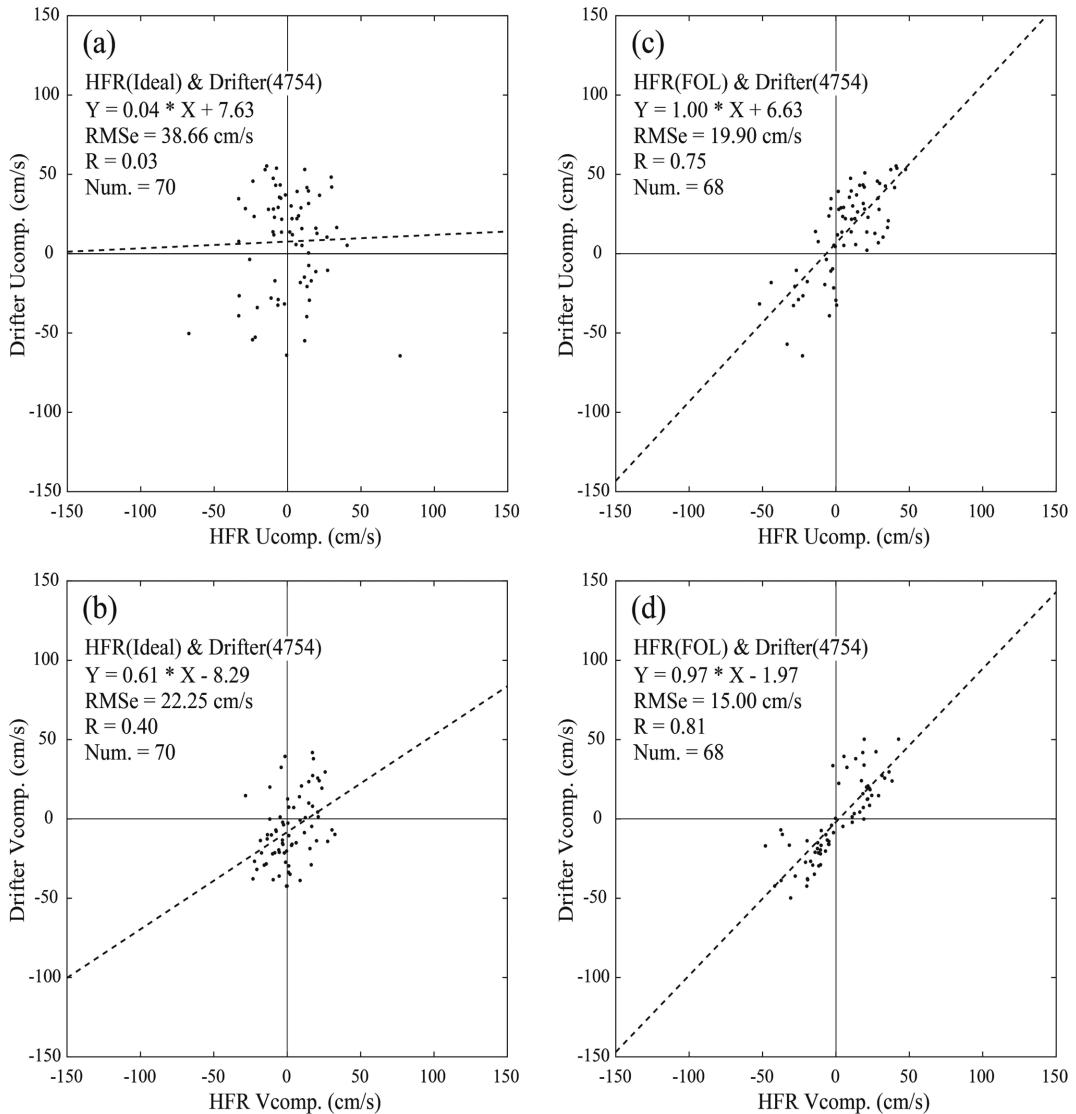


Fig. 6. Scatter plot of drifter and HF radar. (a) Ideal U (b) Ideal V (c) APM + FOL U (d) APM + FOL V. The x-axis is the surface current data of the HF radar at 1-hour intervals, and the y-axis is the result of post-processing the drifter surface current data at the same location and the red dotted line is the trend line of the two data.

방법을 적절하게 활용하여보다 정확한 자료를 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 관측에서는 지속적으로 관측오차가 예상되는 지역에 고정부이의 단기계류를 통한 방식으로 자료를 확인하고, 조화분석을 통한 조류패턴을 분석하고자 하였으며 표층뜰개는 저비용 고효율적인 측면에서 시·공간적 관측을 위해 사용하였다. 본 연구에서는 우선적으로 표층뜰개를 활용하여 공간적인 표층해류 비교분석을 진행하였다. 표층뜰개는 국립해양조사원에서 수행하는 정선 해양관측점 중 317번 정선에 투하하였으며 각각의 뜰개는 투하된 지점에서 대마난류의 흐름을 따라 지속적으로 북상한 뒤 대한해협을 통과하였다(Fig. 5). 제주남부에 설치된 해양레이더의 관측영역에 들어온 동 시간대의 표층뜰개 자료와 비교검증을 수행하였다. 각 관측에서 측정한 표층해류는 이동평균 필터를 사용하여 레이더의 1시간 자료로 평균한 후 사용하였으며, 각 뜰개의 관측지점에서 3 km의 측정원에 들어오는 고주파 레이더 자료

만을 선택하여 각 레이더 지점에서 뜰개 정점으로부터 거리 가중치 평균을 계산하여 표층해류를 산출하였다. 최종적으로 산출된 레이더와 표층뜰개의 해류의 상관계수, RMSE(Root Mean Square Error), 추세선의 기울기 값을 통한 1대1 대응 등의 분석을 진행하였다. 여기서 Ideal 방사형 해류의 합성자료(Fig. 6a, b)와 APM과 FOL을 수행한 방사형 해류의 합성자료(Fig. 6c, d)를 표층뜰개와 비교하였을 때 상관계수에서 0.4~0.7, RMSE 약 1~19 cm/s의 개선 결과를 보였다(Table 3). 특히 표층뜰개 4336번 자료보다 4754번의 자료에서 좀 더 명확한 자료 개선을 나타낸 결과를 볼 때 APM과 FOL의 처리 결과는 제주 남부 중앙자료의 질개선보다 제주남서쪽의 개선효과가 더욱 큰 것으로 여겨진다. 이는 중심주파수가 다양한 조건에서의 타 연구자료 결과(상관계수 약 0.75~0.95, RMSE 약 5~25 cm/s)와 비교하였을 때 유효성 있는 결과를 나타내는 것으로 판단되며, 추가적인 관측 보정(주파수 변경,

Table 3. Comparison result of drifter and HF radar

TOTAL		U				V			
Ideal	Corr.	RMSE	a	b	Corr.	RMSE	a	b	
Drifter 4336 (03/19~27)	0.63	27.94	0.51	12.11	0.49	18.09	0.40	0.91	
Drifter 4754 (03/19~27)	0.03	38.66	0.04	7.63	0.40	22.25	0.61	-8.29	
APM + FOL	Corr.	RMSE	a	b	Corr.	RMSE	a	b	
Drifter 4336 (03/19~27)	0.88	22.84	1.17	16.38	0.55	17.10	0.57	7.81	
Drifter 4754 (03/19~27)	0.75	19.90	1.00	6.63	0.81	15.00	0.97	-1.97	

보간 알고리즘 개선 등)을 통해 정확도를 높이는 것이 필요할 것으로 사료된다(Lee et al., 2008; Röhrs et al., 2015).

2.4 시·공간 자료수집 현황

본 연구에서 사용되는 13 MHz 고주파 레이더는 제원상으로 관측점에서 90 km 영역까지 관측할 수 있으나 이는 이상적인 환경에서의 관측 거리이며 실제 관측에서는 다양한 원인에 의해 자료 결측이 발생한다. 우선적으로 1) 해안에 가까이 설치되는 고주파 레이더의 특성상 염분을 포함하는 해

풍을 지속적으로 맞아 레이더 장비의 부식이 발생하거나 노출된 케이블의 단선, 그리고 내부 관측소의 온도 조절 실패로 인한 Tx/Rx의 장비 고장과 같은 외부 장비의 이상여부가 있다. 그리고 2) 주변의 전파 방해물(금속물질)이나 외부 전파의 유입으로 인하여 배경전파잡음이 높아져 스펙트럼 구분이 어려운 경우가 있으며 이는 내부 진단파일의 Signal to Noise(SNR)이나 Noise Floor(NF) 등을 통하여 확인할 수 있다. 이외에도 3) 자료처리 소프트웨어상에서 원인불명의 프로그램 오류나 전원, 인터넷 통신의 공급이 끊겨 자료획득이



Fig. 7. HF radar real-time response system. (a) Observation status for each site. If it deviates from the stable value, it is displayed in red (b) When an outsider visits the site CCTV, it is notified.

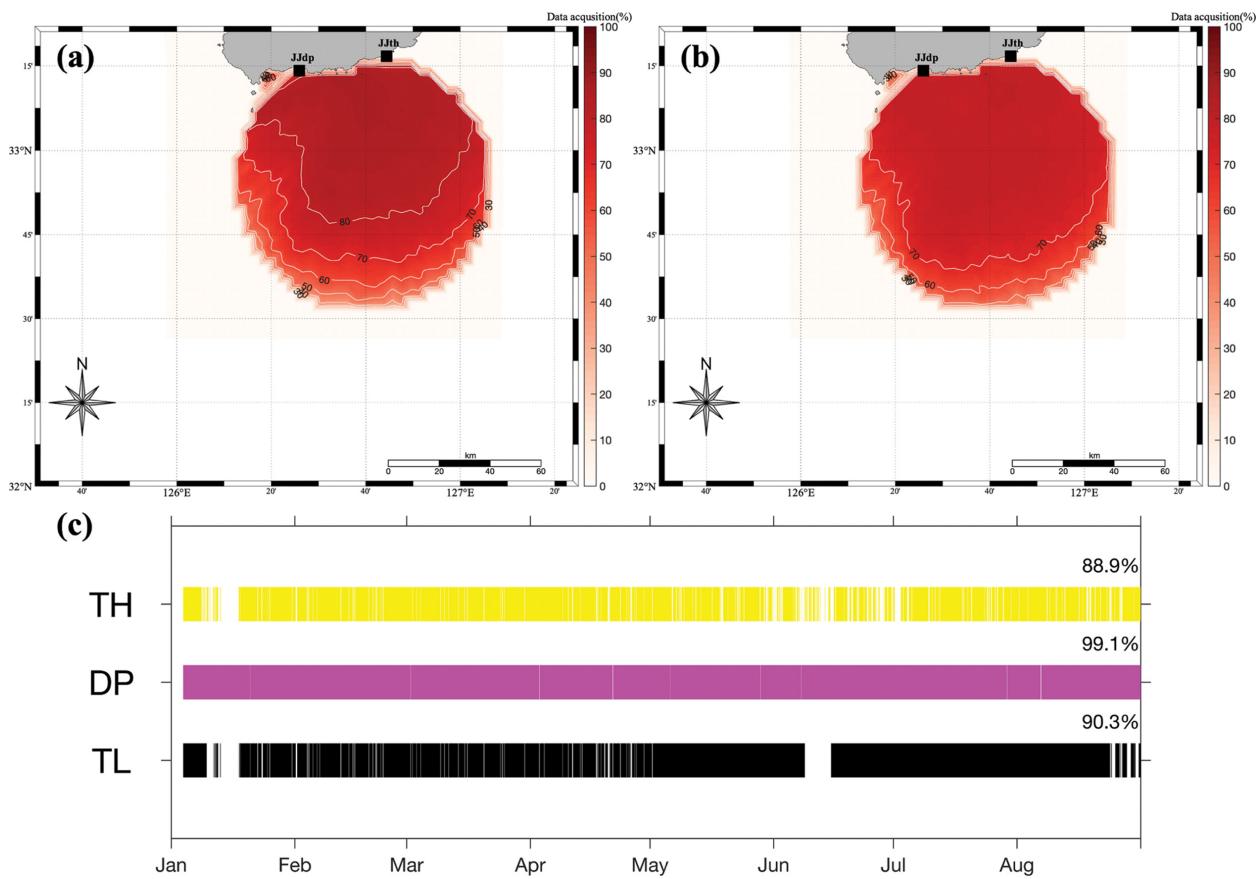


Fig. 8. a, b) Data acquisition rate for total vector by area. c) Data acquisition rate for timeseries.

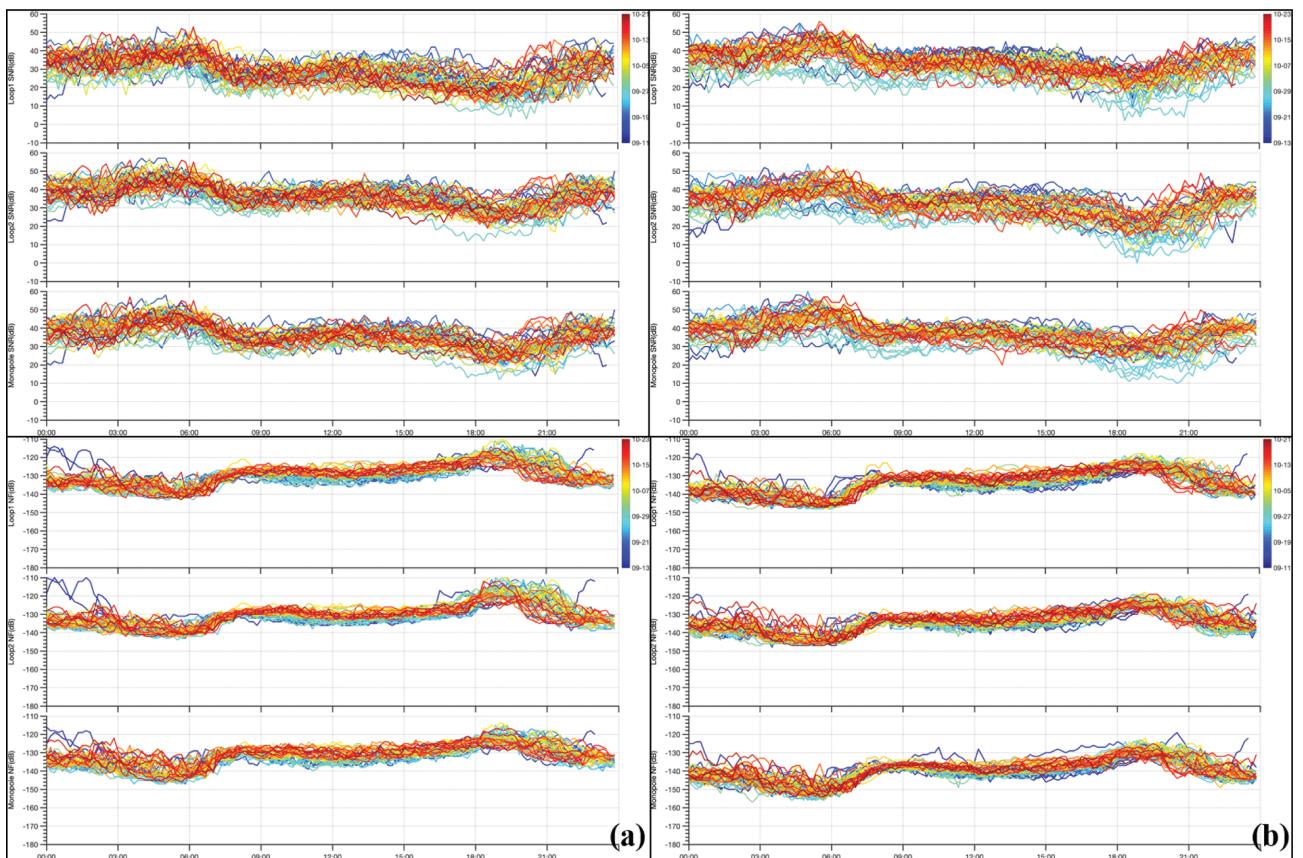


Fig. 9. SNR and NF of a) Deapo and b) Taeheung.

불가한 경우가 있다. 이와 같은 다양한 관측오류 문제를 대응하기 위하여 한국해양과학기술원에서는 실시간 관측자료 및 관측소 모니터링을 진행하여 이에 대응하고 있다(Fig. 7). 지속적인 관측 관리 결과 설치된 이후 2022년 1월경 안테나 전파보정 실험을 진행하여 고품질의 방사형 해류 자료를 생산하기 시작했으며 태풍 내부 관측소의 온도 이상으로 인하여 관측을 중지한 6월을 제외하고 매월 일정한 지역에서 관측률 70% 이상을 유지하였으며(Fig. 8a, b), 진단파일에서도 기간에 상관없이 안정적인 SNR과 NF 값을 보였다(Fig. 9). 그러나 시간 수집율에서 90% 이상의 표층해류 관측 획득률을 보였는데 이 중 태풍 관측소에서 일정시간동안 지속적인 자료의 끊김이 발생하였는데(Fig. 8c), 이는 스펙트럼자료에서 방사형 표층해류자료를 합성하는 과정에서 프로그램의 오류로 확인되었으며 정상화를 위해 운용 컴퓨터를 교체하였다.

3. 향후 계획

제주는 지속적인 기후변화로 인하여 발생하는 슈퍼태풍에 의한 가장 직접적인 피해를 입는 지역이며 이외에도 냉수대로 인한 연안역의 피해 및 양자강으로부터 유입되는 담수와 쓰레기 등으로 인한 해양오염 등 다양한 현안문제가 발생하는 지역이다. 오늘날 전통적인 단기 정점 관측에 더하여 고주파레이더, 위성, 무인관측체계 등 첨단 관측의 운용기술이 안정화됨에 따라 실시간 광역관측의 중요성이 대두되고 있으므로 이를 통한 해황관측의 시·공간적 변화와 이를 실체로 적

용할 수 있는 필요성이 증대되고 있다. 이에 맞추어 본 연구에서는 현재 설치된 4개의 고주파레이더 관측소(신암, 김녕, 대포, 태홍)에 더하여 향후 추가적인 고주파레이더 설치하여 인명수색, 유류오염 및 대응, 제주 연안침식, 연안오염 모니터링, 해양쓰레기 유입원 및 영향연구 등 다양한 현안문제를 대응하고 수행하고자 한다. Fig. 10에 따른 고주파레이더 운영이 모두 가능해진다면 제주 전역의 표층해류를 매시간 실시간으로 관측할 수 있을 것이다.

전 세계적으로 고주파레이더는 각 지역(아시아태평양, 북미, 남미, 유럽)마다 네트워크 시스템을 구축하였으며 유럽연합과 아프리카 1구역, 북미와 남미 2구역, 그리고 아시아 3구역으로 크게 3개의 구역으로 나누어져 있다. 1구역과 2구역에 있는 대부분의 고주파레이더 자료들은 글로벌 네트워크를 구축함으로써 원활한 자료공유를 가능하게 하였으며 이를 통한 선박 탐지, 모델자료 검증 및 예측 파랑 및 조석 관측, 기후 및 생태환경 연구, 특이 물체 및 현상 관측 등에 사용되고 있다(Wyatt, 2012; Abascal et al., 2017; Ren and Hartnett et al., 2017; Zhang et al., 2020). 그러나 1,2 구역과 달리 3구역은 호주를 제외한 전 아시아 국가 대부분이 고주파레이더 자료를 개방하지 않고 폐쇄적으로 사용하고 있으며 특히 국내 고주파레이더의 경우 지역 해류 분석 및 레이더 정확도 검증에 치중되어 있다. 그러므로 한국해양과학기술원에서는 세계적 흐름에 발맞추어 제주해협 고주파레이더 자료의 개방 네트워크를 구축하고 자료 제공을 통해 다양한 목적으로 활용되는 것을 목표로 하고 있다.

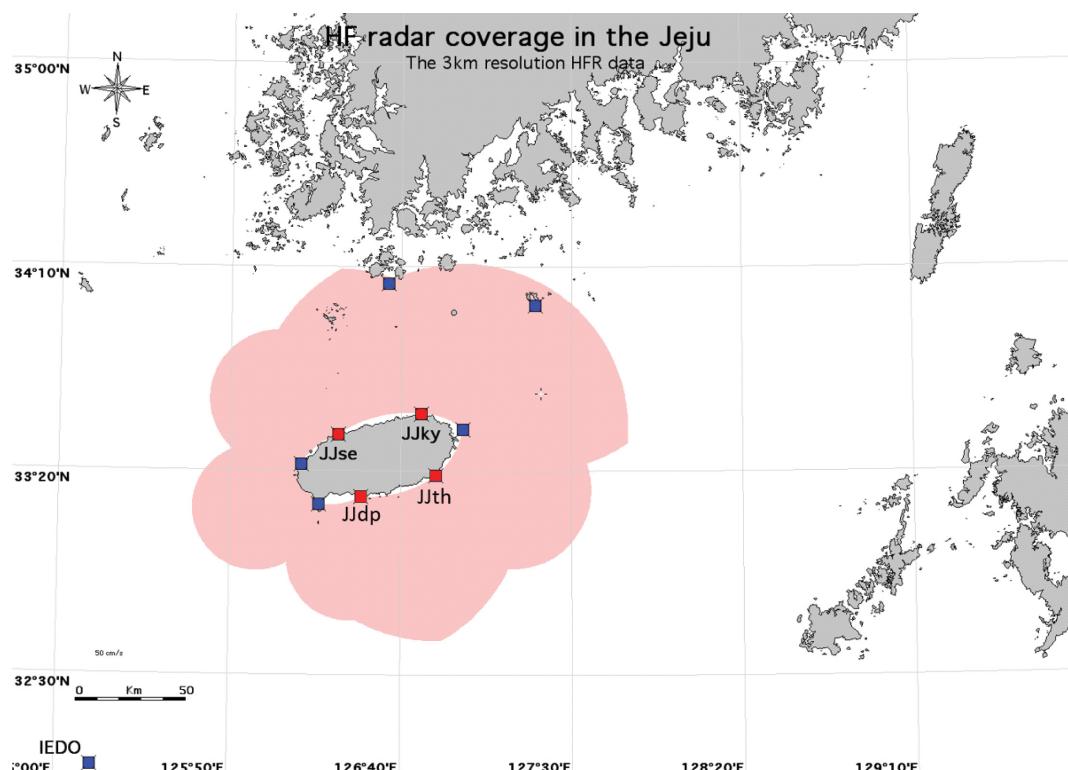


Fig. 10. Target observation area of HF radar in Jeju. It aims to observe the whole surrounding the Jeju Strait.

(1) 태풍반응

최근 태풍의 발생 빈도수의 증가와 그 강도가 강해짐에 따라 태풍에 가장 먼저 영향을 받는 제주지역은 피해가 지속적으로 증가하고 있다. 또한 태풍의 발생 전후에 따라 해류와 전파특성이 변화하며 이에 따른 식생 및 퇴적물 분포가 변화하게 된다(Hong et al., 2021). 그러므로 고주파 레이더의 장기간 표충해류 자료를 통해 이전 태풍 사례들을 분석하여 해류 변화에 의한 태풍 강도 예측 및 해양 환경변화 예측에 도움을 줄 수 있을 것이다.

(2) 수치모델 비교검증

기후 및 해양의 미래 예측 및 다양한 현안 문제 및 사고 대응을 위해서는 광역 예측자료가 필수적이며 이를 수행하는 데는 수치모델이 가장 적합하다고 사료된다. 그러나 수치모델의 예측자료를 정확하게 활용하기 위해서는 산출 자료에 대한 비교검증이 필수적인데 대부분의 해양관측 자료는 정점자료로서 광역자료인 수치모델의 비교검증자료로 활용하기에는 부족함이 있다. 고주파 레이더 자료는 1시간 간격의 높은 시간해상도와 km 단위의 높은 공간해상도를 자료로 수치모델에서 산출되는 광역 표충해류 자료의 비교검증자료로 적합하게 활용할 수 있을 것이다.

(3) 광역파랑자료 활용

고주파 레이더는 광역 표충해류 자료 외에도 km 단위의 일정한 간격의 셀에서 파랑을 관측할 수 있다. 광역 파랑 관측 자료는 해류자료와 동일한 시간간격과 공간에서 자료를 산출 할 수 있으며 이에 대한 자료의 정확도는 AWAC(NorTek Co.), Wave Rider(Korea Meteorological Administration, KMA), 기상청 파고 부이 등의 실측자료를 통하여 상당 수준의 정확성을 입증하였다(Jung et al., 2019). 파랑 에너지의 변동은 인간의 연안 활동에 크게 영향을 미치며 강한 파랑 에너지는 연안 해변 침식 및 쓰나미에 의한 연안피해와 밀접한 관련이 있으므로 고주파 레이더의 실시간 파랑관측은 이를 실시간으로 대응하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

(4) 해양수색구조

또한 제주도 해역은 다양한 해류가 만나 형성되는 전선으로 인해 좋은 어장환경이 생성되어 조업 밀도가 높고 또한 관광특구로 지정된 지역 특수성으로 인해 요트, 유람선과 같이 특수 활동선박이 많아 해상사고가 빈번하게 일어나는 지역이다(Cho et al., 2014). 따라서 이러한 해상사고를 방지하기 위하여 제주 지역의 해상사고 빈도와 선박의 이동경로 분석을 통한 사고 예방이 중요한데 제주 지역에서의 해상사고 발생 후 정보수집에 대한 많은 연구가 있어 왔으나 이에 대한 대처 방안이나 사후 분석에 대한 연구가 부족한 실정이다(Yoon and Choi, 2012; Lee and Ahn, 2019). 이는 해상사고 발생 시에 사후대처를 하기 위해서는 해수유동 정보를 통한 이동

경로 파악과 피해범위 예측이 필요한데 이를 위한 제주지역의 해수유동 분석이 부족하며 특히 제주 남부 해류 특성 및 거동에 관한 연구는 타 해역에 비해 상대적으로 부족한 현실이다. 따라서 고주파 레이다의 실시간 광역표충해류 자료는 이런 해상사고 발생 시 피해범위 예측, 사고 구조물의 이동 경로 예측, 인명구조 등에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론 및 요약

본 논문에서는 해양학적으로 주요한 지리적 위치에 있으나 관측이 저조한 제주해협에서 지형, 전파 환경, 법적 절차 등의 여러 조건을 고려한 후 고주파레이더를 설치하여 광역 표충해류 관측을 실시하였으며 표충뜰개를 통한 실측 관측을 통하여 관측정확도를 검증하였다. 고주파 레이더를 통한 관측 실험 결과는 안테나 패턴 측정(Antenna Pattern Measurement, APM)실험을 통한 전파보정과 스펙트럼 신호 구분(First Order Line, FOL)을 적용하여 자료를 개선하였으며 자료 개선 전·후 자료를 표충뜰개의 해류자료와 비교하였다. 그 결과 자료 개선 후에는 전보다 상관계수에서 0.4~0.7, RMSE 약 1~19 cm/s의 개선 결과를 보였는데 이는 타 연구결과와 비교하였을 때 자료 보정 후 유효한 비교결과에 가까워졌다. 그러나 25 MHz 이상의 고주파레이더 자료와 표충뜰개 간의 비교검증 연구결과에 비해 상관계수와 RMSE에서 다소 낮은 값을 보이는 것은 13 MHz 대역 대가 타 주파수에 비해 사용 빈도가 높아 외부에서 들어오는 전파잡음에 의하여 자료 품질이 떨어질 확률이 높기 때문이다. 이는 추가적인 자료 보정(주파수 보정, 위치 보간 알고리즘 개선 등)을 통하여 자료 개선방법을 찾아야 할 것으로 사료된다. 위의 자료 개선을 통하여 더욱 정확한 고주파레이더 자료를 산출하고 관측지역을 늘려나간다면 인명수색, 유류오염 및 대응, 제주 연안침식, 연안오염 모니터링, 해양쓰레기 유입원 및 영향연구와 같은 다양한 현안문제를 대응하고 수행하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술 진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양수치모델링과 지능정보기술을 활용한 해양예측 정확도 향상 연구).

References

- Abascal, A.J., Sanchez, J., Chiri, H., Ferrer, M.I., Cárdenas, M., Gallego, A., Castanedo, S., Medina, R., Alonso-Martirena, A., Berx, B., Turrell, W.R. and Hughes, S.L. (2017). Operational oil spill trajectory modelling using HF radar currents: A northwest European continental shelf case study. Marine Pollution Bulletin, 119(1), 336-350.

- Barrick, D. and Lipa, B. (1986). Correcting for distorted antenna patterns in CODAR ocean surface measurements. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 11(2), 304-309.
- Cha, S.C. and Moon, J.H. (2020). Current systems in the adjacent seas of Jeju Island using a high-resolution regional ocean circulation model. *Ocean and Polar Research*, 42(3), 211-223 (in Korean).
- Cho, J.H., Ahn, J.Y., Choi, C.M. and Lee, C.H. (2014). The tendency and the effectiveness of policy in marine accident occurring in the sea around Jeju island. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, 50(1), 12-20 (in Korean).
- Choi, J.W., Song, K.M. and Choi, J.Y. (2019). Accuracy improvement of particle tracking model using 2-D current measurement (HF-radar) data. *Journal of Coastal Research*, 91(SI), 251-255.
- Evans, C., Roarty, H., Smith, M., Kerfoot, J., Glenn, S., Parikh, H. and Whelan, C. (2013). Improvement of surface current measurements with spectra reprocessing for 13 MHz SeaSonde systems. In 2013 OCEANS-San Diego. IEEE. 1-5.
- Hong, J.S., Moon, J.H., Yoon, S.H. and Yoon, W.S. (2021). Changes of current and wave patterns depending on typhoon pathways in a shallow channel between Jeju and Udo Island. *Ocean and Polar Research*, 43(4), 205-217 (in Korean).
- Jeong, O.J., Lee, H.J., Pang, I.C. and Lee, J.S. (2008). The characteristics of tide and tidal current around the Jeje-do. In Proceedings of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers Conference. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers. 80-83 (in Korean).
- Jung, D., Lee, J.S., Baek, J.Y., Nam, J., Jo, Y.H., Song, K.M. and Cheong, Y.I. (2019). High temporal and spatial resolutions of sea surface current from low-altitude remote sensing. *Journal of Coastal Research*, 90(SI), 282-288.
- Jung, D., Park, J. and Song, K.M. (2021). Improvements for successful mooring of ocean buoys. *Ocean and Polar Research*, 43(3), 193-203 (in Korean).
- Kirincich, A. (2017). Improved detection of the first-order region for direction-finding HF radars using image processing techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(8), 1679-1691.
- Lai, Y., Zhou, H., Zeng, Y. and Wen, B. (2017). Quantifying and reducing the DOA estimation error resulting from antenna pattern deviation for direction-finding HF radar. *Remote Sensing*, 9(12), 1285.
- Lai, Y., Wang, Y. and Zhou, H. (2020). First-order peaks determination for direction-finding high-frequency radar. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 8.
- Laws, K., Paduan, J.D. and Vesey, J. (2010). Estimation and assessment of errors related to antenna pattern distortion in CODAR SeaSonde high-frequency radar ocean current measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(6), 1029-1043.
- Lee, C.H. and Ahn, J.Y. (2019). A study on appearance frequencies and fishing ground exploration of trawl vessels obtained by analyzing AIS data of vessels in the sea around Jeju island. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, 55(2), 138-144 (in Korean).
- Lee, S.H., Moon, H.B., Baek, H.Y., Kim, C.S., Son, Y.T., Kwon, H.K. and Choi, B.J. (2008). Accuracy of HF radar-derived surface current data in the coastal waters off the Keum River estuary. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography*, 13(1), 42-55 (in Korean).
- Lie, H.J. and Cho, C.H. (2016). Seasonal circulation patterns of the Yellow and East China Seas derived from satellite-tracked drifter trajectories and hydrographic observations. *Progress in Oceanography*, 146, 121-141.
- Lie, H.J., Cho, C.H., Lee, J.H., Lee, S. and Tang, Y. (2000). Seasonal variation of the Cheju warm current in the northern East China Sea. *Journal of Oceanography*, 56(2), 197-211.
- Lipa, B., Barrick, D. and Whelan, C. (2019). A quality control method for broad-beam HF radar current velocity measurements. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(4), 112.
- Oh, H.S., Kim, B.S., Kim, W.B., Chang, M.H. and Lee, S.W. (2009). Current status and management of black-faced spoonbills in wintering site of Jeju Island, Korea. *Korean J. Ornithol.*, 16(1), 61-66 (in Korean).
- Oh, K.H., Lee, S., Kang, S.K. and Song, K.M. (2017). Oceanic response to typhoon Nari (2007) in the East China Sea. *Ocean Science Journal*, 52(2), 167-175 (in Korean).
- Oh, K.H., Lee, S., Park, J., Song, K.M. and Jung, D. (2020). Estimation of effective range of HFR data and analysis of M 2 tidal current characteristics in the Jeju strait. *Ocean and Polar Research*, 42(2), 115-131 (in Korean).
- Ren, L. and Hartnett, M. (2017). Hindcasting and forecasting of surface flow fields through assimilating high frequency remotely sensing radar data. *Remote Sensing*, 9(9), 932.
- Röhrs, J., Sperrevik, A.K., Christensen, K.H., Broström, G. and Breivik, Ø. (2015). Comparison of HF radar measurements with Eulerian and Lagrangian surface currents. *Ocean Dynamics*, 65(5), 679-690.
- Song, K.M., Cho, C.H., Jung, K.T. and Lie, H.J. (2010). Report on the present condition and operating of High Frequency Ocean Surface Radars in Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 22(6), 437-445 (in Korean).
- Song, K.M., Jung, D., Oh, K.H., Shin, C.W., Jo, Y.H., Choi, B.J., Kwon, J. and Lee, S. (2022). Spatio-Temporal Variation of the M2 Tidal Current from Field Observations in the Jeju Strait. *Ocean Science Journal*, 1-16.
- Tian, Y., Wen, B., Li, Z., Yin, Y. and Huang, W. (2019). Analysis and validation of an improved method for measuring HF surface wave radar antenna pattern. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(4), 659-663.
- Wyatt, L.R. (2012). Shortwave direction and spreading measured with HF radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(2), 286-299.
- Yoon, D.Y. and Choi, H.W. (2012). Spatial distribution characteristics of vertical temperature profile in the South Sea of Jeju, Korea. *Journal of the Korean Association of Geographic Information*

- mation Studies, 15(4), 162-174 (in Korean).
- Yuan, Y. and Su, J. (1984). Numerical modelling of the circulation in the East China Sea. In Elsevier Oceanography Series. 39, 167-186.
- Zhang, J.J., Wang, W., Wang, C., Lan, A.L., Yan, J.Y., Xiang, D., Zhang, Q.H., Ruohoniemi, J.M., Kunduri, B.S.R., Nishitani, N., Shi, X. and Qiu, H.B. (2020). First observation of ionospheric convection from the Jiamusi HF radar during a strong geomagnetic storm. Earth and Space Science, 7(1). 1-11.

Received 7 November, 2022

1st Revised 22 November, 2022

2nd Revised 22 November, 2022

3rd Revised 22 November, 2022

Accepted 23 November, 2022