

동해중부에서 HF Radar를 이용한 파랑 및 해수유동 관측

김무홍¹ · 김경수² · 김현성[†]

(원고접수일 : 2014년 2월 7일, 원고수정일 : 2014년 5월 9일, 심사완료일 : 2014년 7월 10일)

Wave and surface current measurement with HF radar in the central east coast of Korea

Moo-Hong Kim¹ · Gyung-Soo Kim² · Hyeon-Seong Kim[†]

요약: 배열형(Array type)의 HF Radar를 임원항(Site A)과 후정리 해변(Site B)에 설치하여 동해연안에 대한 실시간 파랑과 해류를 관측하였다. 본 연구에 사용된 WERA (WavE RAdar)는 2000년 독일 Helzel사에서 개발된 것으로 24.525 MHz의 주파수 대역을 사용한다. 각 사이트는 4기의 송신기와 8기의 수신기로 구성되어 있는 8 채널 시스템이며, 현재 30분 주기로 관측하여 자료를 생성하고 있다. 파랑은 최대 약 25 km, 해류는 최대 약 50 km의 관측 범위를 나타내며, 150 kHz의 대역폭을 사용하여 1.5 km 간격의 격자 해상도를 갖는다. HF Radar를 이용하여 관측한 파랑 자료는 현장에서 관측한 파랑계 자료와 비교·검증을 하였으며, 해류 자료는 국립해양조사원에서 제공한 월별 동해평균표층 해류도와 해류흐름 패턴과 비교하였다. 파랑의 비교 자료들에 대한 회귀선과의 편차는 주성분 분석(Principle Component Analysis)으로 계산하였고, 그 결과로 상관관계 0.86와 RMSD 0.186을 보였다. 또한 동해연안의 해수유동에 대한 장기간의 변화를 분석해본 결과 8월과 9월의 연안에서는 북한한류가 남쪽방향으로, 외해에서는 동한난류가 북쪽방향으로 흐르는 흐름이 나타났다.

주제어: HF Radar, WERA, 파랑, 주성분 분석, 해수유동

Abstract: We installed HF Radar of Array type in Site A and Site B, observing the real-time wave and current in the central East coast of Korea. WERA(WavE RAdar) in this research uses HF Radar of Array Type with frequency range of 24.525 MHz, developed by Helzel, Germany. Each site is a 8-Channel system consisting of four transmitters and eight receivers, generating wave and current data, being observed every thirty minutes at the present time. HF Radar has grid resolution of an interval of 1.5 km using bandwidth of 150 kHz; The wave data covers an observation range of about 25 km, and the current data covers the maximum observation range of about 50 km. The Wave data observed by HF Radar was compared and verified with the AWAC data observed in the research sites. MIT also compared the Current data observed by HF Radar with Monthly the East sea average surface current and current flow pattern provided by KOHA(Korea Hydrographic and oceanographic Administration). The regression line and deviation of the comparison data of Wave was calculated by Principal Component Analysis, which showed correlation coefficient 0.86 and RMSD 0.186. Besides, data analysis of long-term changes of the current in the East coast showed that, during August and September, the North Korean Cold Current flow into the southward direction and the East

[†] Corresponding Author: Marine Information Technology, Gasan-dong, Geumcheon-gu, Seoul, 606-791, Korea,
E-mail: gkimhs@hanmail.net, Tel: 02-2029-7871

1 Ministry of Oceans and Fisheries, E-mail: gimmh54@daum.net,

2 Kunsan National University, E-mail: gs10kim@kunsan.ac.kr,

Korean Warm Current flow into the northward direction in the coast.

Keywords: HF Radar, WERA, Wave, PCA(Principle Component Analysis), Current

1. 서론

연안은 오래 전부터 지속적인 개발이 진행되어 왔으며 한국의 경우에도 최근에 건설되는 무역항과 교역 물량의 증가로 선박에 의한 해상 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 해상사고는 해양오염으로 연결되며 오염물질 확산 예측이 방재를 위해서 필요하지만 자료부족 등으로 정확한 예측이 되지 않고 있는 실정이다. 또한 해양레저 활동의 증대에 따른 인명피해가 해마다 증가되고 있으나 구조활동 또한 실시간자료의 부족으로 어려움을 겪고 있다. 이렇게 증가하는 해상사고, 인명구조 및 지속적인 연안역 모니터링을 위해서는 실시간으로 고 해상도의 표층흐름을 관측할 필요가 있으며 이를 위해 최근에는 HF Radar 이용한 관측이 활발하다

[1].

본 연구에서는 HF Radar를 이용하여 해류를 관측하고 이를 비교검증하기 위하여 동해중부에 위치한 연구대상지역인 삼척시 임원항(Site A)과 울진군 후정해변(Site B)은 관측범위 내에 울진 원자력발전소가 가동 중이며, 삼척중합발전지가 들어설 국가기간산업의 요충지로서 주요 관심 해역이다(Figure 1). 과거 1983년 5월 26일 발생한 동해중부 지진해일은 임원항에 가장 큰 인명과 재산 피해를 가져왔으며, 지진해일 당시 처오름 높이는 최대 7.15 m로 측정되었고 평균 처오름 높이는 대략 3.5~4 m가 측정되었으며, 항구 서측의 임원천을 따라 항구로부터 약 700 m 떨어진 곳까지 범람이 발생하였다[2].

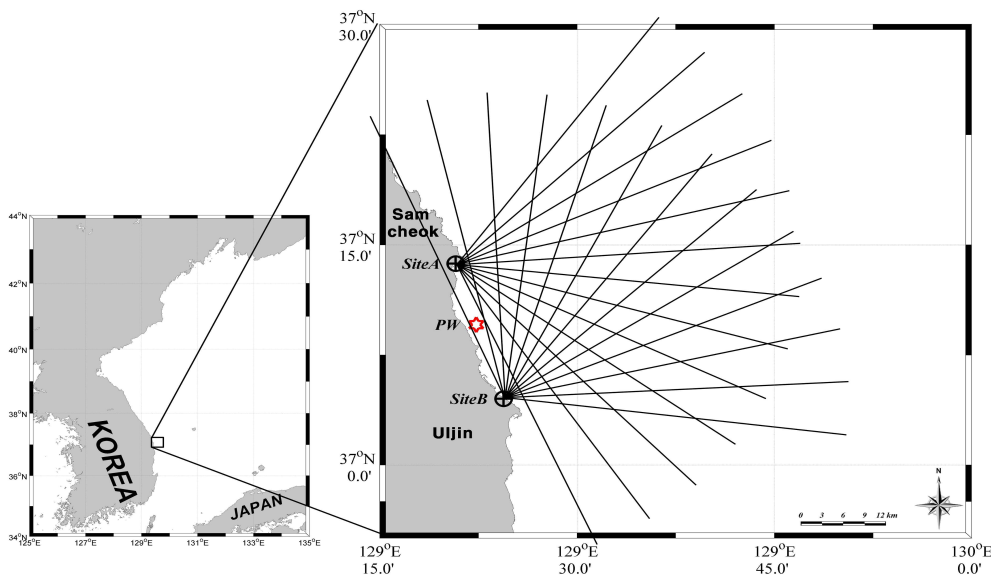


Figure 1: Locations of HF radar sites (Site A and Site B) and mooring site (red star). Range coverage from each radar is drawn by lines (50 km).

본 연구해역과 같이 과거 지진해일, 이상너울 등과 같이 장주기 파랑이 빈번히 발생하는 해역은 지속적인 모니터링을 통해 그 원인을 파악하고 예측시스템을 구축함으로써 그 피해를 최소화하여야 한다. 또한, 본 연구해역은 동해 중부에 위치하고 있으며, 이 해역에서는 남쪽의 동한난류와 북쪽의 북한한류가 만나 동해의 동서방향으로 형성되는 극전선(Polar front)이 연·월 변화하여 나타나는 해역이다[3]. 그리고 각종 해양사고와 해양쓰레기, 적조 등과 같은 오염원의 이동확산 예측을 위해 광역에 걸친 실시간 파랑 및 해수유동에 대한 정보의 제공이 필요한 지역이다. 최근에는 광역의 표층 해수유동을 관측하기 위해 HF Radar가 사용되고 있다. HF radar는 연안에 관측 장비를 설치하여 관리가 용이하고 장기간의 관측이 가능하며, 연안역의 복잡한 해수유동장 변화를 모니터링하기에 유용하여 영국, 일본, 미국, 호주 등지에서 활발히 사용되고 있다[4]-[8].

1.1 HF Radar

HF Radar는 해면을 향해 전파를 발사하고 ‘Bragg scattering effect’에 의해 되돌아오는 전파에는 표층 흐름으로 인한 도플러(Doppler) 효과가 내포되어 있으므로 주파수 변화를 분석하여 Radar로부터 거리와 방향별로 Radial vector들을 얻을 수 있다[9]. 신호수신 방향의 일정각도 폭과 거리간격 내에서 스펙트럼 정보를 산출하므로 거리가 멀어질수록 Radial vector의 간격이 넓어지며, Radial vector에 잡음(Noise)이 많이 포함된다[10][11]. 표층 유속은 적어도 2개의 사이트 이상에서 Radial vector를 관측해야하며, 이렇게 관측된 자료는 중첩된

범위의 해역에서 vector를 합성하여 표층 해수 유동장을 산출하는데 사용된다.

해수면 관측 레이더는 미국, 독일, 일본 등에서 개발되어 현재는 프랑스, 노르웨이, 캐나다, 영국, 호주, 대만 등 전세계 해양 선진국에서 해류 및 파랑관측에 활용하고 있다. 본 연구에 사용된 HF Radar는 2000년 독일 Helzel사에서 제작된 배열형(array type)의 해수면 관측 레이더 시스템(WavE RADAR(WERA) remote HF sensing system)으로 각 관측소당 4개의 송신안테나와 8~16개의 수신안테나가 필요하다(Figure 2). FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)의 Radar type이며, 안테나 형태는 120° 지향성 방식을 가지며, 표층해류와 파랑자료의 정확도를 향상시키고 바람장 정보도 제공한다[12][13]. 본 연구해역에는 각 사이트마다 송신안테나 4개와 수신안테나 8개가 설치된 8 채널 시스템이 도입되었으며, 중심주파수는 24.525 MHz이며, 150 kHz 대역폭을 사용하여 1.5 km의 격자 해상도로 관측되고 있으며, Site A 지점의 중심빔 방위각은 95.8°이며, Site B 지점의 중심빔 방위각은 37.3°이다(Table 1).

Site A 지점은 송신안테나를 설치할 위치가 마땅하지 않아 TX-SAT를 설치하였다(Figure 2). TX-SAT는 독립된 송신기로서 공간적인 효율이 좋으며, 배열형의 Radar를 설치할 때, 송수신 안테나 간의 거리 문제를 보완해주는 장비이다. 또한 TX-SAT의 사용으로 정성적·정량적으로 데이터의 질이 향상되었다. TX-SAT와 Control center는 SSH(Secure shell)를 통해 통신이 이루어진다.

Table 1: Information of installed HF Radar at each site(Site A:Imwon port, Site B:Hujeong beach).

Location			Boresight	Obs. Interval	Sample/ Data Run	Cell Size	Range(Maxium)	
Site	Lat.	Lon.					Current	Wave
Site A	37°13.743'	129°20.770'	95.8°	30 min	3072	1.5 km	50 km	25 km
Site B	37°04.511'	129°24.415'	37.3°					

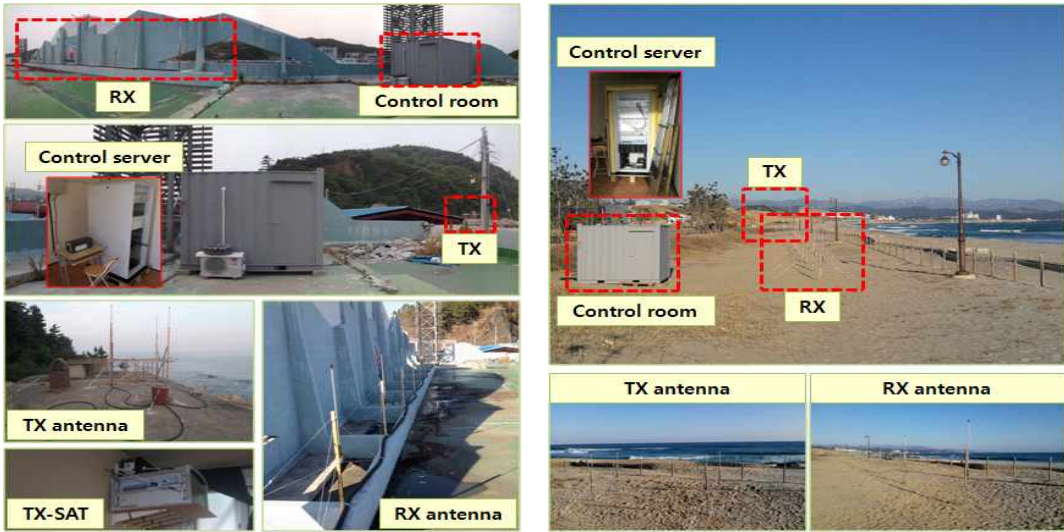


Figure 2: Image of installed WERA remote ocean sensing system (left: Site A, right: Site B).

2. 관측자료 비교·검증

2.1 파랑자료 및 비교분석

파랑은 파워스펙트럼의 역산을 통하여 계산가 가능하며, WERA 시스템은 도플러 스펙트럼에서 Second order를 이용하여 파랑자료를 계산한다 ([14]; Figure 3).

Essen et al. [14]이 제시하는 2차원 파랑 스펙트럼 F의 계산식을 살펴보면 다음과 같다.

$$F(v) = \frac{1}{k} E(k) S(k, \phi), \quad (1)$$

$$v = (k \sin \phi, k \cos \phi) \quad (2)$$

여기서 v 는 파랑벡터, ϕ 는 파향, k 는 파수(wavenumber)이다. $E(k)$ 는 일차원 파수의 스펙트럼 함수, $S(k, \phi)$ 는 파향의 분포함수이다. 장주기파에 의해 first order 도플러스펙트럼이 넓게 퍼지는 현상이 발생하는데 이런 효과를 모델링하여 $E(k)$ 함수와 $S(k, \phi)$ 함수를 자세히 표현하면 다음과 같다.

$$E(k) = \frac{A}{k^3} \exp[-1.25(\frac{\Omega}{\Omega_p})^{-4}] e(\Omega), \quad (3)$$

$$PM: A = 0.005, \Omega_p = 0.88 \frac{g}{U}, e(\Omega) = 1 \quad (4)$$

여기서 Ω_p 는 주파수스펙트럼의 peak 주파수이고, $e(\Omega)$ 는 peak 보강계수이며, PM은 Pierson-Moskowitz 가 제안한 계수를 나타낸 것이다.

$$S(k, \phi) = \begin{cases} 0.64 \cos^2(\phi - \theta), & \text{if } |\phi - \theta| \leq 90^\circ \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)에서 θ 는 평균바람방향이다.

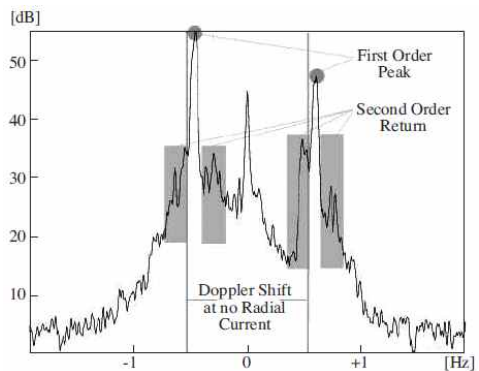


Figure 3: Typical Spectrum from a WERA system; 1st order Bragg lines, shifted slightly off-centre, with superimposed 2nd order lines carrying the wave information.

본 연구에서는 2012년 12월부터 2013년 1월까지 HF Radar로 관측한 유의파랑 자료와 동기간 삼척시 호산항 전면해역(Figure 1)에 Nortek사의 AWAC(Acoustic Wave and Current profiler)을 계

류하여 1시간 간격으로 측정된 유의파랑을 이용하여 월별로 분석하였다.

AWAC 장비의 특징은 AST(Acoustic Surface Tracking)이며, 정밀도는 <math>< 1\%/1\text{cm}</math>이다[15].

비교자료들은 각 측정기기의 오차를 최소화하기 위해 주성분 분석(Principal Component Analysis)을 이용하여 회귀분석(Regression analysis) 하였다. 주성분 분석의 제1성분 벡터는 회귀선을 의미하며, 제 2성분 고유치는 회귀선의 직각 방향에 대한 분산이다.

HF Radar로 관측된 유의파랑을 추출할 때 GDOP(Geometric Dilution Of Precision)값이 작은 영역을 선택하는 것이 기하학적 오차를 줄일 수 있는 방법이다. 하지만 AWAC의 계류위치는 동해 연안의 수심이 동쪽으로 갈수록 급격히 깊어지기 때문에 현실적으로 해안에서 5 km를 벗어나기 힘들며, 이로 인해 본 연구해역의 위치가 HF Radar 파랑을 계산할 때 발생하는 GDOP값이 높은 영역에 위치하게 되었다(Figure 4). 따라서, HF Radar의 GDOP가 작은 유의파랑 추출지점과 AWAC의 유의파랑의 관측지점의 거리 차이가 발생하였다.

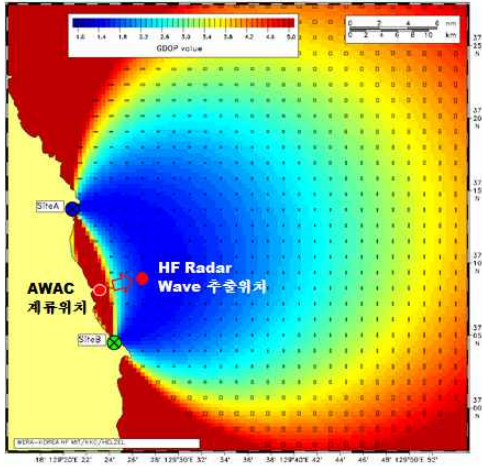


Figure 4: GDOP of WERA remote ocean sensing system.

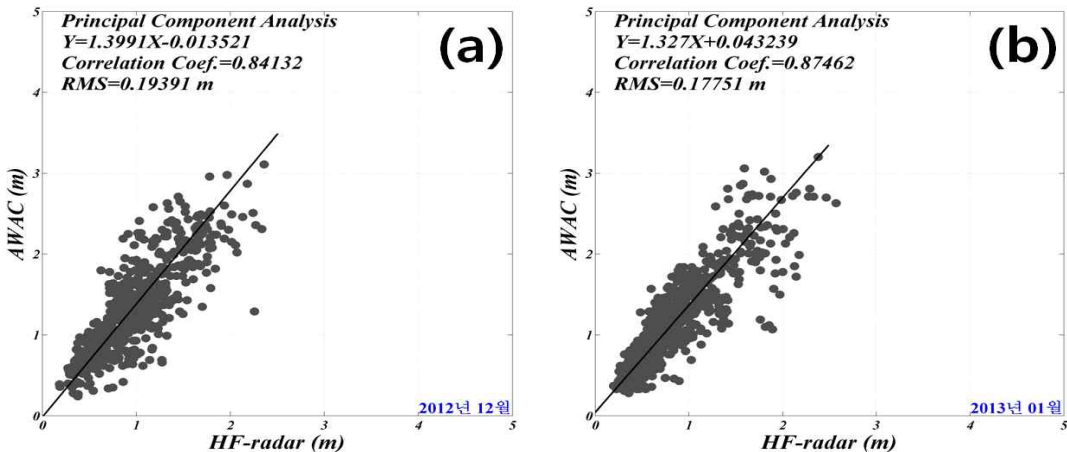


Figure 5: Regression analysis results are obtained from PCA in (a) 2012.12 and (b) 2013.01.

Table 2: Comparison statistics of Hs by HF Radar and wave meter mooring.

Observation period	$y=ax+b$	Correlation coefficient	RMSD(m)
2012. 12.	$y=1.399x-0.014$	0.84	0.194
2013. 01.	$y=1.327x-0.043$	0.87	0.178

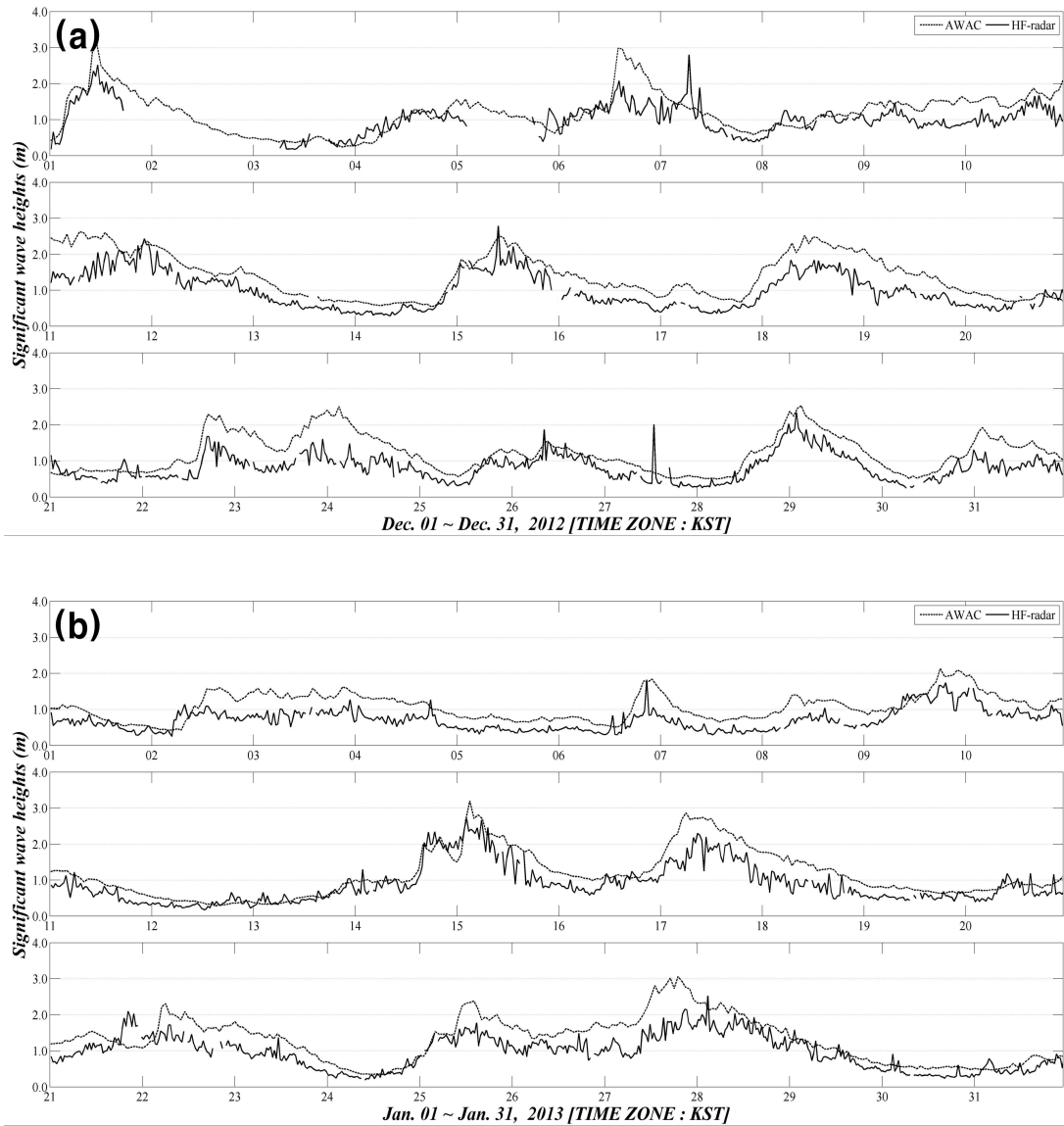


Figure 6: Comparison of Hs time series plot by HF Radar and wave meter mooring.

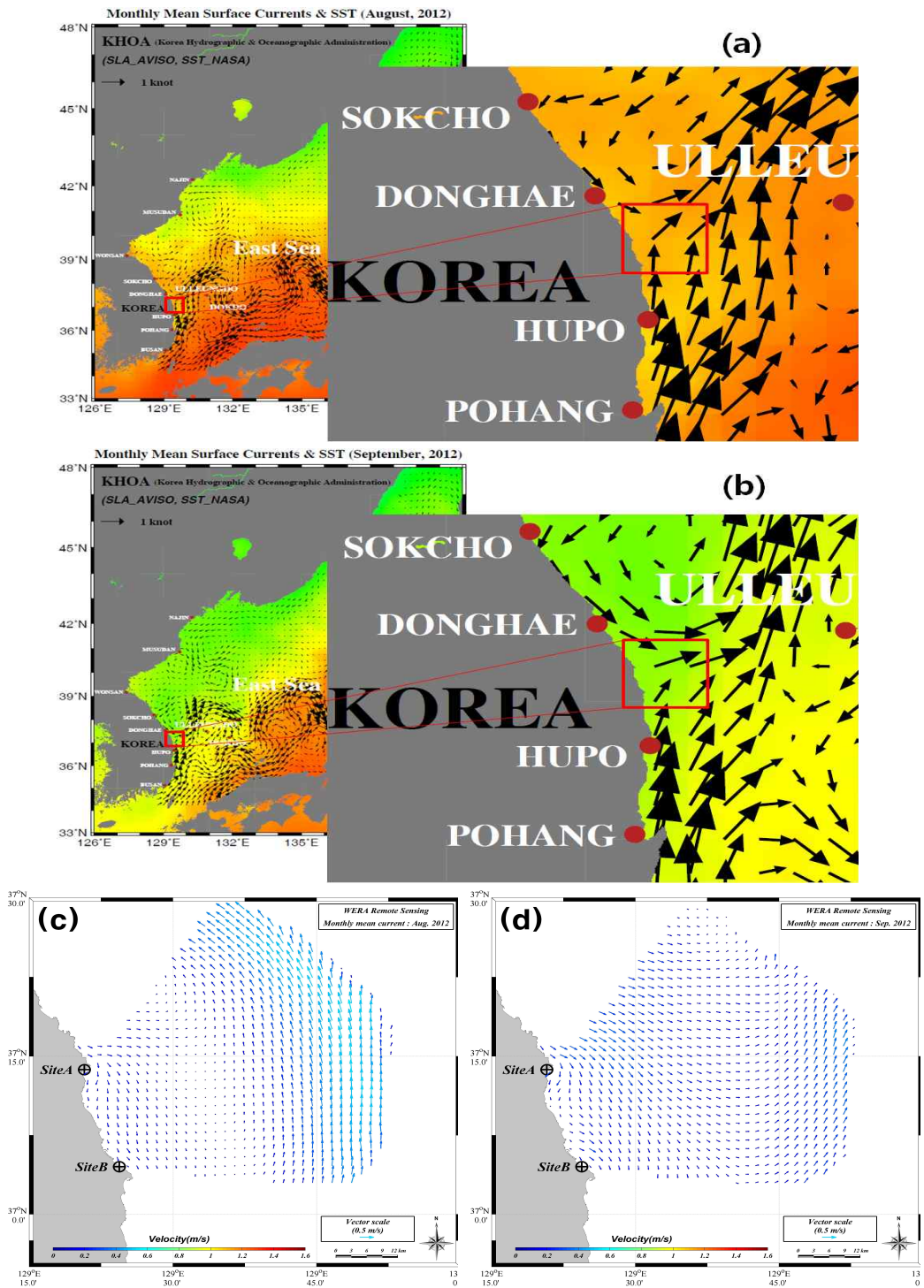


Figure 7: Monthly mean surface currents by KHOA(a, b) and WERA system(c, d) in August(a, c) and September(b, d). Red box(a, b) is observation area of HF Radar.

HF Radar와 AWAC장비로 관측한 2012년 12월 ~ 2013년 1월 파랑자료를 주성분 분석으로 비교하였다. 2012년 12월은 회귀선의 기울기가 약 1.4로 AWAC의 유의파랑이 HF Radar로 관측된 유의파랑보다 40% 정도 크게 나타났고, 절편은 거의 0에 가까우며, RMS 편차는 약 19 cm로 작은 값을 보이고, 상관계수는 0.84로 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다(Figure 5-6, Table 2). 2013년 1월의 회귀선은 기울기가 약 1.33으로 AWAC의 유의파랑이 HF Radar로 관측된 유의파랑보다 약 33% 크게 나타났고, 절편은 거의 0에 가까우며, RMS 편차는 약 18 cm로 작은 값을 보이고, 상관계수는 0.87로 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다(Figure 5-6, Table 2).

파랑자료의 분석결과를 살펴보면, 2012년 12월보다 2013년 1월의 관측 자료가 더 높은 상관관계와 작은 RMS 편차를 보였다. 또한 AWAC장비로 관측한 파랑값이 HF Radar로 관측한 파랑값보다 약 36%정도 크게 관측되었는데, 파랑의 크기가 차이가 나게된 이유는 AWAC장비로 관측한 지점이 HF radar로 관측한 지점보다 연안쪽에 위치해 있기 때문이라고 사료된다. 일반적으로 동해안은 암반이 많이 존재하며 해안지역에 가까울수록 반사파가 강해서 파랑의 크기가 증가할 수 있다. GODA가 제시한 파랑의 반사율 개략치를 살펴보면 자연해빈인 경우 0.05~0.2의 반사율을 보이는데, 동해지역은 모래보다 암반이 우세하므로 파랑 관측자료의 36% 정도 크기차이는 발생가능한 수치이다[16].

2.2 해류자료 및 비교분석

해류 자료는 도플러 스펙트럼에서 First order를 이용하여 계산하며(Figure 3), 유속의 계산식은 다음 식 (6)과 같다.

$$f_d = \left(\frac{v}{c} + 1 \right) f_0 \quad (6)$$

$$v = c \left(\frac{f_d}{f_0} - 1 \right) \quad (7)$$

식 (7)에서 v는 유속, c는 빛의속도, f_d 는 도플

러주파수, f_0 는 radar의 주파수이다.

본 연구에서는 국립해양조사원(KHOA)에서 제공하는 월별 동해평균표층 해류도를 이용하여 HF Radar로 관측한 월별 평균표층 해류도와 비교를 통해 본 연구해역에서 나타나는 평균표층해류의 흐름을 분석하였으며, 분석에 사용된 월별 평균표층 해류도는 2012년 8월과 9월의 자료이다(Figure 7). 8월의 평균해류도를 보면 연구해역을 기준으로 연안에서는 북한한류가 남쪽방향으로 흐르며, 외해에서는 동한난류가 북쪽방향으로 흐르는 흐름을 볼 수 있다(Figure 7(a), (c)). 9월의 평균해류도를 보면 연구해역을 기준으로 연안 가까운 해역은 북한한류가 남쪽방향으로 흐르며, 외해에서는 북쪽방향으로 흐른다. 그리고 연안과 외해의 중간 해역에서는 북한한류와 동한난류가 만나 북한한류는 동남쪽으로, 동한난류는 북동쪽으로 흐르는 흐름이 나타난다(Figure 7(b), (d)). 이는 최근 발표된 인공위성 고도계로 관측한 동해 표층해류의 움직임과 부합한 내용이다([3];Figure 8, 9).

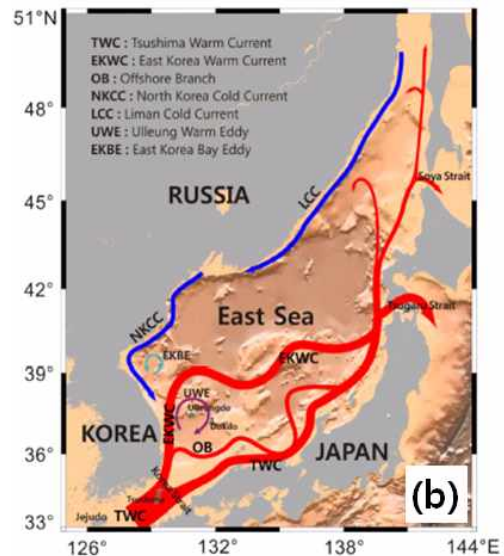


Figure 8: meandering triple branch and cold currents modified from Senjyu (1999), Choi et al. (2004), Lee and Niiler (2005), Danchenkov et al. (2006) and Talley et al. (2006)

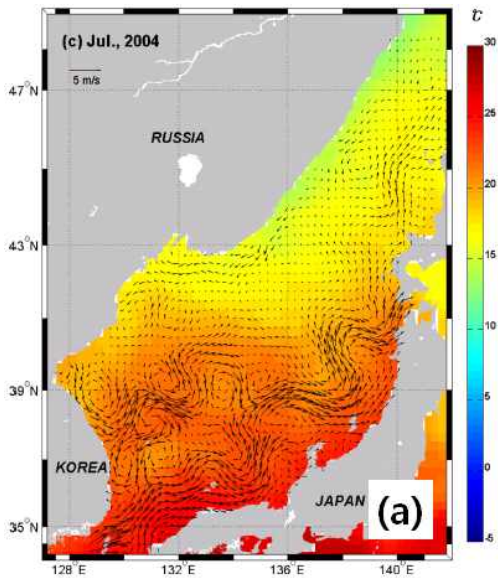


Figure 9: Surface currents (m/s) estimated from satellite altimeter data and satellite-borne sea surface temperature (°C) in 2004 July

3. 요약 및 결론

본 연구의 대상해역에 배열형(array type)의 HF Radar를 설치하였으며, 설치된 HF Radar는 Helzel사의 WERA remote ocean sensing system이다. HF Radar는 임원항(Site A)과 후정해변(Site B)에 각각 4개의 송신기와 8개의 수신기를 갖는 8 Channel 시스템을 구축하여 30분 간격으로 파랑과 해수유동을 모니터링하고 있다. HF Radar에 사용되는 주파수는 24.525 MHz이며, 150 kHz 대역폭을 사용하여 1.5 km의 격자 해상도를 갖는다. 또한 Site A 지점은 전세계적으로 적용사례가 몇 번 밖에 없는 TX-SAT(system에 종속되지 않는 독립 무선송신기로 TX와 WERA system과 통신)를 설치하여 공간적인 제약을 해결하고 자료의 질을 향상시켰다.

HF Radar와 AWAC파랑계로 관측된 자료에 대한 주성분 분석결과 상관계수가 약 0.86으로 높은 상관관계를 보이며 두 비교자료의 유의성을 확인하였으며, RMS편차가 약 20 cm 미만으로 나타났다.

고, 회귀선의 기울기는 1.36으로 AWAC자료의 파랑값이 36% 더 높게 나왔다. 이러한 관측값의 차이는 해안가로 갈수록 반사파가 커지며 동해안이 주로 암반으로 구성되어있기 때문인 것으로 보이며 HF Radar 관측지점보다 해안가에 가까운 AWAC관측자료의 파랑이 더 높게 나타났다. 월별 평균표층 해류도를 이용하여 대상 해역의 흐름을 분석해본 결과 8월과 9월에는 주로 연안에서는 북한한류가 남쪽방향으로 흐르며, 외해에서는 동한난류가 북쪽방향으로 흐르는 흐름이 나타났다.

본 연구에서는 파랑 관측 자료의 부재로 동일 정점에 대한 비교·분석이 이루어지지 못했으며, 이로 인해 오차가 다소 포함되었다. 또한 해류는 정량적인 분석이 아닌 해류도를 이용한 월별 평균해류 흐름만을 분석하였다. 이는 연구해역에 대한 전반적인 해류 흐름만을 본 것으로 HF Radar 관측 자료의 정확성을 검증하는데 한계가 있다. 추후 연구해역의 GDOP값이 작은 해역에서 표층 뜰개(Surface drifter) 등을 이용한 관측을 통해 정성적·정량적인 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 한국해양과학기술진흥원 미래해양산업기술개발사업의 지원으로 수행되고 있으며, 월별 평균표층 해류도를 지원해 주신 국립해양조사원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D. H. Kim, C. H. Lim, H. B. Moon, H. Y. You, and S. D. Hong, "Use of HF radar for the observation of sea surface current and the present operational status" Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 35, no. 2, pp.123 - 123, 2011 (in Korean).
- [2] S. M. Kim, S. O. Lee, M. K. Choi, and Y. S. Cho, "Field survey of 1983 central East Sea Tsunami : Imwon Port", Korean Society of Hazard Mitigation, vol. 7, no. 4, pp. 97-105, 2007 (in Korean).
- [3] B. J. Choi, D. S. Byun, and K. H. Lee,

- “Satellite-altimeter-derived East Sea surface currents: Estimation, description and variability pattern” *Journal of the Korean Society of Oceanography*, vol. 17, no. 4, pp. 225-242, 2012 (in Korean).
- [4] D. Prandle, “The fine structure of near shore tidal and residual circulations revealed by H.F. radar surface current measurements”, *Journal of the Physical oceanography*, vol. 17, no. 2, pp. 231-245, 1987.
- [5] J. D. Paduan and H. C. Graber, “Introduction to HF radar, reality and myth”. *oceanography*, vol. 10, no. 2, pp. 36-39, 1997.
- [6] P. J. Knight and M. J. Howarth, “The flow through the northern channel of the Irish Sea”. *Continental Shelf Research*, vol. 19, pp. 693-713, 1999.
- [7] B. K. Haus, J. D. Wang, J. Martinez-Pedraja, and N. Smith, “Remote radar measurement of shelf currents off Key Largo, Florida, USA. estuarine”, *Coastal and Shelf Sciences*, vol. 51, no. 5, pp. 553-569, 2000.
- [8] S. H. Lee, H. B. Moon, H. Y. Baek, C. S. Kim, Y. T. Son, H. K. Kwon, and B. J. Choi, “Accuracy of HF radar-derived surface current data in the coastal waters off the Keum River estuary”, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, vol. 13, no. 1, pp. 42-55, 2008 (in Korean).
- [9] D. E. Barrick, M. W. Evans, and B. L. Weber, “Ocean surface currents mapped by radar”, *Science*, vol. 198, no. 4313, pp. 138-144, 1977.
- [10] R. D. Chapman, L. K. Shay, H. C. Graber, J. B. Edson, A. Karachintsev, C. L. Trump, and D. B. Ross. “On the accuracy of HF radar surface current measurements: inter-comparisons with ship-based sensors”, *Journal of the Geophysical Research*, vol. 102, no. 18, pp. 18737-18748, 1997.
- [11] Y. Yoshikawa, A. Masuda, K. Marubayashi, M. Ishibashi, and A. Okuno, “On the accuracy of HF radar measurement in the Tsushima Strait”, *Journal of the Geophysical Research*, vol. 111, no. C04009, pp. 1-10, 2006.
- [12] K. M. Song, C. H. Cho, K. T. Jung, and H. J. Lie “Report on the present condition and operating of high frequency ocean surface radars”, *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, vol. 22, no. 6, pp. 437-445, 2010 (in Korean).
- [13] T. Helzel, M. Kniephoff, and L. Petersen “Oceanography radar system WERA: features, accuracy, reliability and limitations”, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 18 no. 3, pp. 389-397, 2010.
- [14] H. H. Essen, K. W. Gurgel, and T. Schlick, “On the accuracy of current measurements by means of HF radar”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, no. 4, pp. 472-480, 2000.
- [15] Nortek As, “AWAC brochure”, <http://www.nortek-as.com/lib/brochures/datasheet-awac> Accessed July 14, 2014.
- [16] Y. Goda, “On the methodology of selecting design wave height”, *Proceedings 21st International Conference Coastal Engineering*, pp. 899-913, 1988.