



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

교육학석사학위논문

**Sentinel-1A/B SAR 자료를 활용한  
한반도 주변해 해상풍 산출**

**Retrieval of Sea Surface Wind from  
Sentinel-1A/B SAR Data in the Seas  
around Korea**

2018년 2월

서울대학교 대학원  
과학교육과 지구과학전공  
장재철

Sentinel-1A/B SAR 자료를 활용한

한반도 주변해 해상풍 산출

**Retrieval of Sea Surface Wind from**

**Sentinel-1A/B SAR Data in**

**the Seas around Korea**

지도교수 박 경 애

이 논문을 교육학석사 학위논문으로 제출함

2018 년 2 월

서울대학교 대학원

과학교육과 지구과학전공

장 재 철

장재철의 석사 학위논문을 인준함

2018 년 2 월

위 원 장      서 기 원      (인)

부위원장      박 경 애      (인)

위      원      최 변 각      (인)

## 초 록

해상풍은 파도, 해류, 해양 순환 및 대기-해양 상호작용 연구에 중요한 요소 중 하나로, 우리에게 복합적인 해양 현상에 대한 전체적인 이해를 제공한다. 기후변화에 대한 관심이 증대되면서 전 세계 바람장 관측의 중요성이 강조되어 왔고, 그에 따라 European Space Agency (ESA)와 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서는 산란계를 이용하여 전 세계 바람장 자료를 산출해왔다. 이러한 산란계 자료는  $\pm 2$  m/s의 정확도를 보여주지만, 낮은 공간 해상도로 인해 연안 바람장의 결핍과 작은 규모의 해양 현상 분석이 불가능하다는 단점을 보인다. Synthetic Aperture Radar (SAR)는 능동 마이크로파를 사용하여 대기 및 기상 상태에 의한 영향이 적고, 수십 m의 공간해상도를 가지고 있어 1 km 이하의 고해상도 바람장 자료 산출이 가능하다. 그로 인해 SAR 자료는 연안 바람장 자료 산출 및 작은 규모의 해양 현상 분석이 가능하다는 장점이 있지만 기존의 SAR 자료에 대한 접근성은 낮았다. Sentinel-1A/B 위성은 C-Band(5.405 GHz) SAR를 탑재한 위성으로, 기존의 SAR 탑재 위성과는 다르게 SAR 자료 수집이 용이하며, Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR) 기술을 사용하여 관측 범위가 넓기 때문에 다양한 분야 연구에 활발히 사용되고 있다. 본 연구에서는 2015년 5월 1일부터 2017년 9월 30일까지 총 395장의 Sentinel-1A/B Interferometric Wide swath 모드 수직 이중 편파 자료(vertical dual polarization)를 수집하여 처리하였다. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Model (DEM) 자료를 이용하여 육지 차폐(Land masking) 과정을 거친 후, 적응 임계치 방법(adaptive threshold method)을 적용하여 선박을 탐지하여 제거하고, 스펙클 잡음(speckle noise)을 제거하기 위해 배경장을 설정하여 앙상블 평균(ensemble average)을 취하는 전처리 과정을 거쳤다. 전처리 과정을 거친 Sentinel-1A/B 자료를 C-Band VV 편파 산란계 자료를 기반으로 개발된 CMOD4, CMOD\_IFR2, CMOD5, CMOD5.N, CMOD5.Na 알고리즘에 적용하여 한반도 주변 해역

에서의 고해상도 해상풍을 산출하고, 산출한 결과를 기상청 해양 기상 부이의 실측 자료와 비교하였다. 산출한 결과 Root Mean Square Error (RMSE)가 CMOD4는 1.83 m/s, CMOD\_IFR2는 1.82 m/s, CMOD5는 1.69 m/s, CMOD5.N은 1.68 m/s, CMOD5.Na는 1.65 m/s로 나타나 CMOD5.Na 알고리즘이 우리나라 연안 해상풍을 가장 잘 모의하는 것으로 나타났다. 해역별로는 황해 해역이 다른 해역에 비해 편향(bias)이 큰 것으로 나타났다는데, 이는 낮은 수심 해역에서의 해저 지형이 해수면 거칠기에 영향을 줘 해상풍의 오차 요인으로 작용한 것으로 해석된다. 본 연구를 통해서 Sentinel-1A/B 자료를 이용하여 산출한 우리나라 주변 연안 고해상도 해상풍 자료는 복잡한 연안 해양 현상 기작에 대한 연구에 활발히 사용될 것으로 기대된다.

주요어 : 고해상도 해상풍, Sentinel-1A/B, 적응 임계치 방법, C-Band SAR  
자료 기반 GMFs

학 번 : 2016-21608

# 목 차

초록 .....	i
List of Tables .....	v
List of Figures .....	vi
1. 서론 .....	1
2. 연구 자료 .....	5
2.1. SAR 자료 .....	5
2.2. 대기 모델 자료와 육지 고도 자료 .....	7
2.3. 실측 자료 .....	8
3. 연구 방법 .....	11
3.1. 육지 영역 차폐 및 선박 탐지 방법 .....	11
3.2. 해상풍 산출 방법 .....	15
3.3. 10 m 해상풍 환산 .....	21
3.4. 이중 편파 SAR 자료의 Pol-SAR 분해 .....	24
4. 연구 결과 .....	27
4.1. 일치점 데이터베이스 .....	27
4.2. 해상풍 산출 정확도 .....	29
4.3. 해상풍 산출 오차 분석 .....	34
4.3.1. 수심의 영향 .....	34
4.3.2. 선박의 영향 .....	39

4.3.3. 기름의 영향 .....	41
4.3.4. 기타 영향 .....	44
<b>5. 요약 및 결론 .....</b>	<b>47</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>49</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>57</b>

## List of Tables

Table 1. Sentinel-1A/B products characteristics .....	6
Table 2. Marine meteorological buoy station specification of Korea Meteorological Administration (KMA) in the seas around the Korean Peninsula .....	10
Table 3. List of accuracy of geophysical model functions such as CMOD4, CMOD_IFR2, CMOD5, and CMOD5.N based on previous research and satellite onboard C-Band SAR .....	17
Table 4. Accuracy of sea surface wind retrieval from Sentinel-1A/B IW mode data by C-Band Geophysical Model Functions (GMFs) such as CMOD4, CMOD_IFR2, CMOD5, CMOD5.N and CMOD5.Na, and Corr. indicates correlation coefficient .....	33



## List of Figures

- Figure 1. Large scale bathymetry map of the seas around the Korean Peninsula, where the black stars and the red text around the stars indicate location and name of KMA marine meteorological buoy station around the Korean Peninsula, respectively ..... 9
- Figure 2. Illustration of the target window, guard window, and background window for adaptive threshold method ..... 13
- Figure 3. Flow chart for ship detection and compensation process from Sentinel-1A/B IW mode data using the adaptive threshold method ..... 14
- Figure 4. Flow diagram for sea surface wind retrieval from radiometric calibrated Sentinel-1A/B IW mode data in vertical-vertical (VV)-polarization ..... 16
- Figure 5. Simulation of 10-m height wind speed retrieval from LKB model as a function of air temperature and sea surface temperature at a given wind speed (7 m/s), observation height of wind (3.9 m), humidity (0.8), observation height of humidity (3.6 m), air pressure (1013 hPa), and observation height of air temperature (3.4 m) ..... 23
- Figure 6. Characteristics of matchup database, (a) the number of matchup data on that time from May 1, 2015 to September 30, 2017,

the distribution of (b) sea surface temperature, (c) sea surface temperature minus air temperature, (d) relative humidity, and (e) wind vector in meteorological convention of matchup data ..... 28

Figure 7. Scatter plot of in-situ wind speed versus estimated wind speed and in-situ wind versus wind speed difference from Sentinel-1A/B IW mode data using (a), (b) CMOD4, (c), (d) CMOD\_IFR2, (e), (f) CMOD5, (g), (h) CMOD5.N, and (i), (j) CMOD5.Na, respectively ..... 30

Figure 8. Scatter plot of in-situ wind speed versus estimated wind speed from Sentinel-1A/B IW mode data using (a), (b), (c) CMOD4, (d), (e), (f) CMOD\_IFR2, (g), (h), (i) CMOD5, (j), (k), (l) CMOD5.N, and (m), (n), (o) CMOD5.Na in East Sea, Southern region, and Yellow Sea, respectively ..... 32

Figure 9. Tendency of wind speed difference for in-situ wind speed, red triangle and errorbar indicate mean and standard deviation of error, respectively, and dashed blue line means linear regression line of mean error, in (a) East/Japan Sea, (b) Southern region, and (c) Yellow Sea ..... 35

Figure 10. Scatter plot of depth of KMA marine meteorological buoy versus wind speed difference, red triangle and errorbar indicate mean and standard deviation of error, respectively ..... 36

Figure 11. Effect of bathymetry on wind speed estimation from

Sentinel-1A/B in shallow region, subscene of RGB composite image of Landsat-8 OLI/TIRS on (a) April 27, 2017 and (b) May 6, 2017, raw data of sigma naught from Sentinel-1B on (c) May 6, 2017 and Sentinel-1A on (d) May 19, 2017, (e) wind speed estimation from (c), and (f) wind speed estimation from (d) using CMOD5.Na ..... 38

Figure 12. Effect of ship on wind speed estimation from Sentinel-1A on March 25, 2017, subscene of (a) raw data of sigma naught, (b) sigma naught averaged in 11 by 11 moving window after ship detection and compensation using adaptive threshold method from (a), (c) wind speed estimation from (b) using CMOD5.Na algorithm .. 40

Figure 13. Effect of ship oil on wind speed estimation and polarimetric features extracted from Sentinel-1B on April 19, 2017, subscene including a ship oil of (a) VV-polarized sigma naught image, (b) VH-polarized sigma naught image, (c) wind speed estimation using CMOD5.Na algorithm from (a), (d) entropy, H, (e) Anisotropy, A, and (f) mean alpha angle,  $\alpha$  ..... 42

Figure 14. Effect of biogenic oil on wind speed estimation and polarimetric features extracted from Sentinel-1A on April 13, 2016, subscene including a biogenic oil of (a) VV-polarized sigma naught image, (b) VH-polarized sigma naught image, (c) wind speed estimation using CMOD5.Na algorithm from (a), (d) entropy, H, (e) Anisotropy, A, and (f) mean alpha angle,  $\alpha$  ..... 43

Figure 15. Effect of ship wake on wind speed estimation and

polarimetric features extracted from Sentinel-1A on April 30, 2016, subscene including a ship wake of (a) VV-polarized sigma naught image, (b) VH-polarized sigma naught image, (c) wind speed estimation using CMOD5.Na algorithm from (a), (d) entropy, H, (e) Anisotropy, A, and (f) mean alpha angle,  $\alpha$  ..... 45

Figure 16. Effect of atmospheric gravity wave and oceanic internal wave on backscattering coefficient, subscene of (a) Sentinel-1A including atmospheric gravity wave on May 24, 2016 and (b) Sentinel-1B including oceanic internal wave on July 19, 2017 ..... 46

# 1. 서론

해상풍은 파도, 해류, 해양 순환 및 대기-해양 상호작용 연구에 중요한 요소 중 하나로, 우리에게 복합적인 해양 현상에 대한 전체적인 이해를 제공한다. 기후변화에 대한 관심이 증대되면서 바람장에 대한 지속적인 관측이 강조되어 왔다. 1990년대 초부터 European Space Agency (ESA)와 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서는 European Remote Sensing-1/2 (ERS-1/2), NASA Scatterometer (NSCAT), Quick Scatterometer (Quikscat), Advanced Scatterometer (ASCAT), Rapid Scatterometer (RapidScat)과 같은 산란계(scatterometer)를 발사하여 지속적으로 전 세계 바람장을 관측하고 있다(Ebuchi, 1999; Liu and Chan, 1999; Risien and Chelton, 2008). 산란계로부터 산출된 바람장 자료는 25 km의 공간 해상도를 가지며, 매일 해빙이 없는 전 세계 바다의 약 92%를 망라하는 바람장 자료를 지속적으로 산출하고 있다(Ebuchi et al., 2002). 산란계 바람장 자료는 풍속은 2 m/s, 풍향은 20° 안팎의 정확도를 보이고, 수치 예보 모델의 입력 자료로 사용되어 모델의 정확도를 높여주며, 태풍, 용승, 열속(heat flux), 엘니뇨, 대기-해양 상호작용과 같은 복잡한 해양 현상 기작을 이해하는데 사용되었다(Liu et al., 1998; Chen et al., 1999; Jones et al., 1999; Park and Cornillon, 2002; Sato et al., 2002; Castelao and Barth, 2006; Park et al., 2006). 하지만, 이러한 산란계 바람장 자료는 낮은 공간 해상도로 인해 연안 바람장 자료의 결핍과 작은 규모의 해양 현상 분석이 불가능하다는 단점을 보인다.

합성 개구 레이더 (Synthetic Aperture Radar, SAR)는 능동 마이크로파 센서로 대기 및 기상 상태에 의한 영향이 적어 전천후 센서로 사용되고 있다. SAR에서 송신한 마이크로파는 지표면에서 반사되어 돌아오고, 수신된 에너지를 이용하여 후방산란계수(backscattering coefficient)를 산출한다. 전 세계 연구기관에서는 ERS-1/2, Shuttle Imaging Radar with Payload C (SIR-C), RADARSAT-1/2, Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR), Advanced Land Observing Satellite-1/2 Phased Array L-band

Synthetic Aperture Radar (ALOS-1/2 PALSAR), TerraSAR-X, COstellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation (COSMO-SkyMed), KOrean Multi-Purpose SATellite-5 (KOMPSAT-5), Sentinel-1A/B와 같이 SAR를 탑재한 인공위성을 지속적으로 발사하였고, 이를 이용하여 장기적이고 지속적으로 해양을 관측하고 있다. SAR는 산란계에 비해 수십 m의 높은 공간 해상도를 가지고 있어 1 km 이하의 고해상도 바람장을 산출하기 때문에 산란계로 산출한 바람장보다 상세한 바람장 구조 분석과 산란계에서는 산출 불가능한 연안 바람장 산출이 가능하다(Korsbakken et al., 1998; Furevik and Korsbakken, 2000; Yang et al., 2011). 이러한 장점으로 인해 SAR를 이용한 해상풍 산출 결과는 연안 용승, 해양 전선(front), 연안 지형(topography)에 의한 활강 바람(katabatic wind)의 영향과 같은 연안 해양 환경 모니터링(Johannessen et al., 1996; Li et al, 2007, 2009; Gurova et al., 2013), 용승과 전선지역에서의 대기-해양 상호작용, 태풍에 의한 해양 특성 변화, 대기 중력파(atmospheric gravity wave)로 인한 해수면 거칠기 변화와 같은 해양 대기 경계층(marine atmospheric boundary layer)에서의 현상 연구에 사용되고 있다(Johannessen et al., 1996; Li et al., 2002, 2004, 2011, 2013; Kim et al., 2014, 2017).

SAR를 이용한 해상풍 산출 방법은 산란계 해상풍 산출 방법을 기반으로 개발되었다. SAR 자료에는 HH(수평편파송신-수평편파수신), HV(수평편파송신-수직편파수신), VV(수직편파송신-수직편파수신), VH(수직편파송신-수평편파수신) 편파와 같이 4 종류의 편파 모드(mode)가 존재하고, 각 편파 모드에서 측정된 후방산란계수에 따른 경험식을 기반으로 Geophysical Model Functions (GMFs)가 개발되었다. GMFs는 레이더가 사용하는 파장 및 편파에 따라 달라지며, 입사각, 레이더 관측 각(radar look angle)에 대한 풍향의 상대 방향, 10 m 높이에서의 풍속 및 후방산란계수를 성분으로 하는 관계식으로 표현된다. C-Band SAR VV 편파 자료에 적용 가능한 GMFs는 CMOD4, CMOD\_IFR2, CMOD5, CMOD5.N, CMOD5.Na이다. CMOD4는 European Centre for Medium-Range Weather

Forecasts (ECMWF) 수치 예보 모델 분석 결과를 기반으로 개발되었고, CMOD\_IFR2는 풍속에 대한 계수는 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)의 부이(buoy)자료를, 풍향에 대한 계수는 ECMWF 수치 예보 모델 분석 결과를 기반으로 개발되었다. CMOD5는 ECMWF 수치 예보 모델 분석 결과를 기반으로 CMOD4의 극단적인 풍속에서의 결함을 개선하였고, CMOD5.N은 CMOD5의 편향(bias)을 보완하였으며, CMOD5.Na는 수치 예보 모델 분석 결과를 기반으로 CMOD5.N의 입사각에 따른 잔차(residual)를 수정한 알고리즘이다 (Stoffelen and Anderson, 1997; Quilfen et al., 1998; Hersbach et al., 2005, 2007; Hersbach, 2010; Verspeek et al., 2012).

SAR 자료는 공간 해상도가 좋고 관측 당시의 정확한 바람장 산출이 가능하다는 장점이 있지만, 능동 마이크로파 센서이기 때문에 자료의 양이 적고 자료의 취득도 어려워 광대한 데이터베이스(database)를 구축하는데 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 SAR 자료의 높은 공간 해상도를 이용하여 우리나라 주변 연안을 중심으로 연안 바람장 산출, 기름 유출 모니터링, 해류 및 파도 분석과 같은 연구가 이루어졌다(Kim and Moon., 2002; Kim et al., 2003; Gang et al., 2007; Kim et al., 2010; Moon et al., 2010; Kim et al., 2014). 하지만 수십 장의 SAR 자료 데이터베이스를 구축하여 연구하기에는 여전히 한계가 있었고, 실측 자료와는 일치점(matchup) 개수가 적어 산란계 바람장 자료를 SAR 자료 기반 산출 해상풍의 정확도 평가 기준 자료로 사용하기도 하였다(Kim et al., 2010, 2012).

Sentinel-1 임무(mission)는 두 개의 인공위성으로 구성된 Global Monitoring for Environment and Security (GMES) 프로그램이다. Sentinel-1A는 2014년 4월 3일, Sentinel-1B는 2016년 4월 22일에 ESA에서 발사한 C-Band SAR 탑재 위성으로, 산림, 수계(water system), 농업, 해양 환경, 해빙, 자연 재해 및 재난 지역 등의 전 세계 지구 환경 모니터링을 관측 목적으로 한다(Velotto et al., 2016). 재방문시간(revisit time)은 12일로, 두 위성이 약 700 km의 고도에서 180도 간격으로 같은 궤도를 공전

하기 때문에 한 지역을 6일에 한 번씩 관측하고, Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR) 기술을 사용하여 넓은 관측 폭(swath width) 및 좋은 공간 해상도를 보이기 때문에 전 세계 지구 환경 모니터링에 유리하다(Torres et al., 2012). 이러한 특징과 더불어 Sentinel-1A/B 자료는 기존 SAR 자료에 비해 접근성이 뛰어나 자료 획득이 용이하여 광대한 데이터베이스를 구축이 가능하다.

Sentinel-1A/B 인공위성은 2014년 4월부터 지구 환경을 주기적으로 관측하고 있어 지속적으로 고해상도 해상풍 자료 산출이 가능한 반면, Sentinel-1A/B 자료를 기반으로 산출된 해상풍의 정확도를 평가한 연구는 아직 이루어지지 않은 실정이다. 본 연구에서는 우리나라 연안에서의 해양 현상에 대한 상세한 분석을 위해 Sentinel-1A/B 자료를 이용하여 고해상도 해상풍 자료를 산출하고 정확도를 평가하고자 하였다. 기존의 SAR 자료 기반 고해상도 해상풍 자료의 정확도 평가 연구는 10장 안팎의 SAR 자료를 처리하거나 산란계 자료와의 상호 비교를 통해 이루어졌지만, 본 연구에서는 (1) 395장의 Sentinel-1A/B 영상을 처리하였고, (2) CMOD4, CMOD\_IFR2, CMOD5, CMOD5.N, CMOD5.Na 알고리즘을 적용하여 고해상도 해상풍 자료를 산출하였으며, (3) 각 알고리즘의 해상풍 산출 결과를 기상청 해양 기상 부이 실측 자료와의 비교를 통해 정확도를 정량적으로 평가하였고, (4) 각 알고리즘의 해상풍 산출 결과를 비교 분석하여 한반도 연안 환경에 적합한 알고리즘을 제시하였으며, (5) SAR 자료를 이용하여 고해상도 해상풍 자료를 산출할 때, 발생하는 오차 요인에 대해서 분석 및 제시하였다.



## 2. 연구 자료

### 2.1. SAR 자료

한반도 주변 해역의 고해상도 해상풍을 산출하기 위해서 2014년과 2016년에 ESA에서 발사한 Sentinel-1A/B 자료를 수집하였다. Sentinel-1A/B는 C-Band SAR를 탑재하고 있으며, 중심 주파수는 5.405 GHz이다. Stripmap (SM), Interferometric Wide swath (IW), Extra-Wide swath (EW), Wave (WV)와 같은 총 4 종류의 촬영 모드가 있으며, 각 촬영 모드는 모두 HH, VV 단일 편파(single-polarized) 자료 산출이 가능하고, WV 모드를 제외한 나머지 촬영 모드는 HH+HV, VV+VH 이중 편파(dual-polarized) 자료도 산출 가능하다. 본 연구에서는 한반도 주변 해역에 대한 촬영 영상이 가장 많은 IW 모드 수직 이중 편파(VV+VH) 자료를 사용하였다. IW 모드 자료의 관측 폭은 약 250 km이고, 공간 해상도는 5 m (range 방향) X 20 m (azimuth 방향), 입사각의 범위는 29.1°에서 46.0°까지 이른다(Table 1). 2015년 5월 1일부터 2017년 9월 30일까지의 자료를 취득하였으며, 총 395장의 IW 모드 수직 이중 편파 자료를 사용하였고, azimuth 방향과 range 방향으로 공간 해상도가 일치하고 스펙클 잡음(speckle noise)을 줄이기 위해서 4 (range 방향) X 1 (azimuth 방향) multi-looking을 적용하였다.

Table 1. Sentinel-1A/B products characteristics

Mode	Stripmap (SM)	Interferometric Wide swath (IW)	Extra-Wide swath (EW)	Wave (WV)
Swath width	80 km	250 km	400 km	20 km
Incidence angle range	18.3° - 46.8°	29.1° - 46.0°	18.9° - 47.0°	21.6° - 25.1° 34.8° - 38.0°
Resolution	5 m × 5 m	5 m × 20 m	20 m × 40 m	5 m × 5 m
Polarization options	HH+HV, VV+VH, HH, VV	HH+HV, VV+VH, HH, VV	HH+HV, VV+VH, HH, VV	HH, VV
Maximum Noise Equivalent Sigma Zero	-22 dB	-22 dB	-22 dB	-22 dB
Radiometric stability	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)
Radiometric accuracy	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)
Phase Error	5°	5°	5°	5°

## 2.2. 대기 모델 자료와 육지 고도 자료

Sentinel-1A/B IW 모드 자료를 이용하여 해상풍을 산출하기 위해서는 풍향 정보가 필요하다. 풍향 정보를 산출하는 방법으로는 SAR 영상을 기반으로 산출하는 방법(Lenher et al., 1998; Vachon and Dobson, 2000; Koch, 2004), HH+HV+VH+VV 사중 편파(quad polarized) 자료를 이용하여 산출하는 방법(Zhang et al., 2012, 2015), 외부 자료를 이용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 ECMWF 재분석(reanalysis) 바람장 자료를 외부 입력 자료로 사용하여 풍향 정보를 산출하였다. ECMWF 재분석 바람장 자료는 1979년 1월 1일부터 현재까지 지속적으로 산출되는 전 세계 대기 재분석 모델 자료로, 공간 해상도는 약 80 km이고, 매 6시간(0 UTC, 6 UTC, 12 UTC, 18 UTC)마다 해당 시간의 자료 사용이 가능하다. Sentinel-1A/B 위성이 한반도 주변 해역을 관측하는 시각은 상승 궤도(ascending orbit)의 경우 9 UTC, 하강 궤도(descending orbit)의 경우 21 UTC 부근으로 재분석 바람장 자료와 SAR 자료 사이의 시간 차이는 3시간 이내이다.

본 연구에서는 SAR 영상 내에서 육지 영역을 차폐(land masking)하기 위해 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Model (DEM) 자료를 활용하였다. SRTM DEM 자료는 NASA의 우주 왕복 프로그램 주관 하에 2000년 2월 11일부터 2000년 2월 22일까지 12일 동안 우주 왕복선 Endeavor를 통해서 측정된 육지 고도 자료로, 1 arc-seconds (약 30 m)의 공간 해상도를 가지며, 56°S에서 60°N까지의 근전지구적(near-global) 범위를 포함한다.

### 2.3. 실측 자료(In-situ measurement)

Sentinel-1A/B IW 모드 자료를 이용하여 산출한 해상풍의 정확도를 평가하기 위해 기상청 해양 기상 부이 실측 자료를 사용하였다. 기상청에서 관리하는 해양 기상 부이는 총 17개로, 황해에는 6개, 동해에는 5개, 남쪽 해역에는 6개의 부이가 위치하고, 한반도 주변 해역에 고르게 분포하고 있다(Figure 1). 해양 기상 부이는 1시간 또는 30분 간격으로 해양 환경을 관측하며 해수면을 기준으로, 수온은 -1.2 m에서 -0.1 m, 기온은 2.9 m에서 3.9 m, 습도는 2.9 m에서 3.4 m, 풍속은 3.6 m에서 4.0 m, 풍향은 4.0 m에서 4.4 m 범위의 높이에서 측정한다(Table 2). 본 연구에서는 Sentinel-1A/B 영상 내 화소(pixel)와 부이의 공간 거리는 20 m 이내에 위치하고, Sentinel-1A/B 영상 촬영 시간과 부이의 관측 시간 간격은 1시간 이내인 조건을 만족하는 경우, Sentinel-1A/B 자료와 해양 기상 부이의 일치점 자료로 구축하였다.

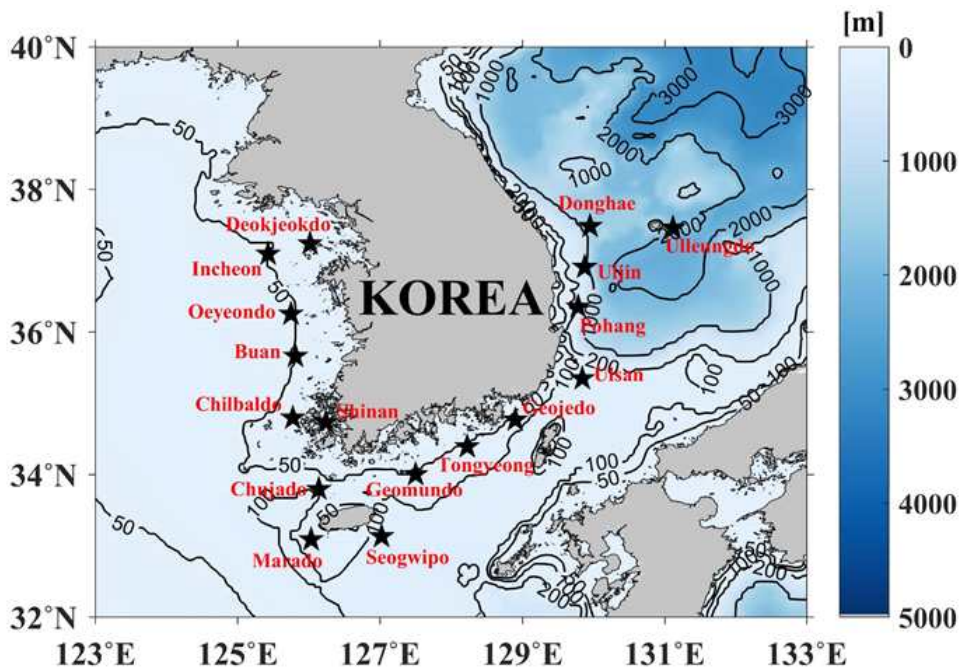


Figure 1. Large scale bathymetry map of the seas around the Korean Peninsula, where the black stars and the red text around the stars indicate location and name of KMA marine meteorological buoy station around the Korean Peninsula, respectively

Table 2. Marine meteorological buoy station specification of Korea Meteorological Administration (KMA) in the seas around the Korean Peninsula

Station	Location		Observation height (m)						Depth (m)
	Longitude	Latitude	Atmospheric			Wind		Sea	
			Temp.	Humidity	Pressure	Speed	Direction	Temp.	
Ulleungdo	131°06'52"E	37°27'20"N	3.9	3.4	0.2	3.9	4.4	- 1.2 / - 0.4	2,200
Deokjeokdo	126°01'08"E	37°14'10"N	3.4	3.4	0.2	3.6	4.3	- 0.2 / - 0.3	30
Chilbaldo	125°46'37"E	34°47'36"N	3.4	3.4	0.2	3.6	4.3	- 0.2 / - 0.3	33
Geomundo	127°30'05"E	34°00'05"N	3.4	3.4	0.2	3.6	4.3	- 0.2 / - 0.3	80
Geojedo	128°54'00"E	34°46'00"N	3.4	3.4	0.2	3.6	4.3	- 0.2 / - 0.3	87
Donghae	129°57'00"E	37°28'50"N	3.9	3.4	0.2	3.9	4.4	- 1.2 / - 0.4	1,518
Pohang	129°47'00"E	36°21'00"N	3.9	3.4	0.2	3.9	4.4	- 1.2 / - 0.4	310
Marado	126°02'00"E	33°05'00"N	3.9	3.4	0.2	3.9	4.4	- 1.2 / - 0.4	130
Oeyeondo	125°45'00"E	36°15'00"N	3.4	3.4	0.2	3.6	4.3	- 0.2 / - 0.3	47
Shinan	126°14'30"E	34°44'00"N	3.4	3.4	0.2	3.6	4.3	- 0.2 / - 0.3	25
Chujado	126°08'28"E	33°47'37"N	2.9	2.9	0.3	4.0	4.0	- 0.1	85
Incheon	125°25'44"E	37°05'30"N	3.4	3.4	0.2	3.6	4.3	- 0.2 / - 0.3	40
Buan	125°48'50"E	35°39'31"N	3.4	3.4	0.2	3.6	4.3	- 0.2 / - 0.3	50
Seogwipo	127°01'22"E	33°07'41"N	3.9	3.4	0.2	3.6	4.3	- 1.2 / - 0.4	105
Tongyeong	128°13'30"E	34°23'30"N	3.4	3.4	0.2	3.6	4.3	- 0.2 / - 0.3	55
Ulsan	129°50'29"E	35°20'43"N	3.9	3.4	0.2	3.6	4.3	- 1.2 / - 0.4	145
Uljin	129°52'28"E	36°54'25"N	3.9	3.4	0.2	3.6	4.3	- 1.2 / - 0.4	700

### 3. 연구 방법

#### 3.1. 육지 영역 차폐 및 선박 탐지 방법

SAR 영상 내에서 해양 영역은 단일 산란(single scattering)으로 인해 지표면에서 반사되어 돌아오는 에너지가 낮아 후방산란계수의 값이 작다. 그에 반해 육지 영역은 단일 산란, 이중 산란(double scattering), 체적 산란(volume scattering)의 복합적인 발생으로 인해 해양 영역보다 후방산란계수가 크게 나타난다. 해양 영역 내에 존재하는 선박 또한 이중 산란 및 직접 반사가 우세하게(dominantly) 발생하여 해양 영역보다 후방산란계수가 크게 나타난다. SAR 자료를 이용하여 정교한 해상풍을 산출하기 위해서는 바다 영역에 포함된 선박을 탐지하여 제거하는 과정이 필요하고, 정확하게 선박을 탐지하기 위해서는 육지 영역을 차폐하는 과정이 먼저 선행되어야 한다. SAR 영상 내에서 육지 영역과 선박을 제거하지 않고 해상풍을 산출하게 되면, 선박의 후방산란계수에 의해 오차가 포함된 해상풍을 추정하게 되고, 이는 주변 영역에도 영향을 주기 때문에 해상풍의 오차 요인으로 작용하여 정확한 해양 현상 분석을 방해한다.

본 연구에서는 육지 영역 차폐 과정을 위해서 SRTM DEM 자료를 사용하였다. Sentinel-1A/B 자료와 SRTM DEM 자료의 공간 해상도는 각각 약 20 m, 30 m 이기 때문에 Sentinel-1A/B 자료의 위도, 경도 정보에 부합하게 SRTM DEM 자료를 내삽(interpolation)하여 육지로 판별되는 부분을 제거하였다. 육지 영역 차폐 과정이후에는 SAR 영상 내 해양 영역에 존재하는 선박을 제거하는 과정을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 선박 탐지 알고리즘은 적응 임계치 방법(adaptive threshold method)이다(Friedman et al., 2000, 2001; Chen et al., 2005; Martín-de-Nicolás et al., 2015). 적응 임계치 방법은 전체 영상에 일괄적인 임계치를 적용하는 전역적 임계치 방법(global threshold method)과 유사한 관계식을 사용하지만, 관측하는 영역에 대한 주변 영역 특성(local

characteristics)을 기반으로 임계치를 지속적으로 수정하여 적용하는 방법이다. 적응 임계치 방법을 적용하기 위하여 표적창(target window), 보호창(guard window), 배경창(background window)을 설정한다. 표적창은 보호창보다 작고, 보호창에 포함되어야 하며, 배경창은 보호창보다 크고, 보호창을 포함해야 한다(Figure 2). 보호창을 제외한 배경창으로부터 평균( $\overline{\mu}_B$ )과 표준편차( $\sigma_B$ )를 계산하고, 표적창에서의 평균( $\overline{\mu}_T$ )을 계산한다. 계산한 평균과 표준편차를 이용하여 다음 관계식에 따라 탐지 변수(detection parameter)  $d$ 를 산출한다.

$$d = \frac{\overline{\mu}_T - \overline{\mu}_B}{\sigma_B} \quad (1)$$

$d$ 가 설정한 임계치보다 클 경우, 표적창을 선박으로 판단하고, 그렇지 않을 경우에는 해양으로 판단한다. 세 개의 창은 azimuth 방향과 range 방향으로 각각 1칸씩 이동하면서 SAR 전체 영상에 대해 적용된다.

선박으로 판별된 화소는 해상풍을 산출하였을 때, 해당 위치의 실제 해상풍을 표현하지 않기 때문에 주변 영역의 특성을 기반으로 보상해주는 과정이 필요하다. 11 X 11 크기의 창을 설정하여 선박으로 판별된 화소를 제외한 주변 화소의 후방산란계수를 기반으로 앙상블 평균(ensemble average)을 계산하였고, 선박으로 판별된 화소에 앙상블 평균을 대입하였다(Figure 3).



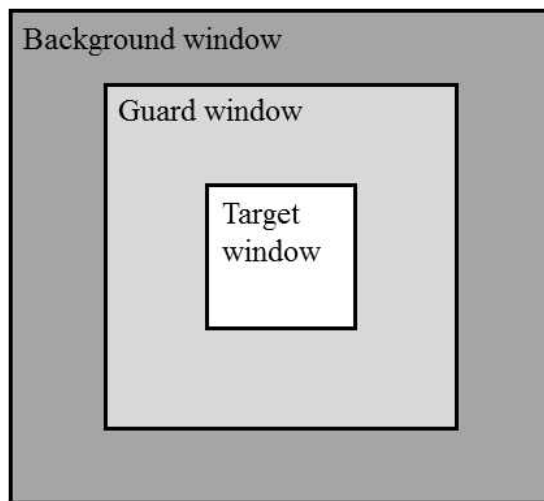


Figure 2. Illustration of the target window, guard window, and background window for adaptive threshold method

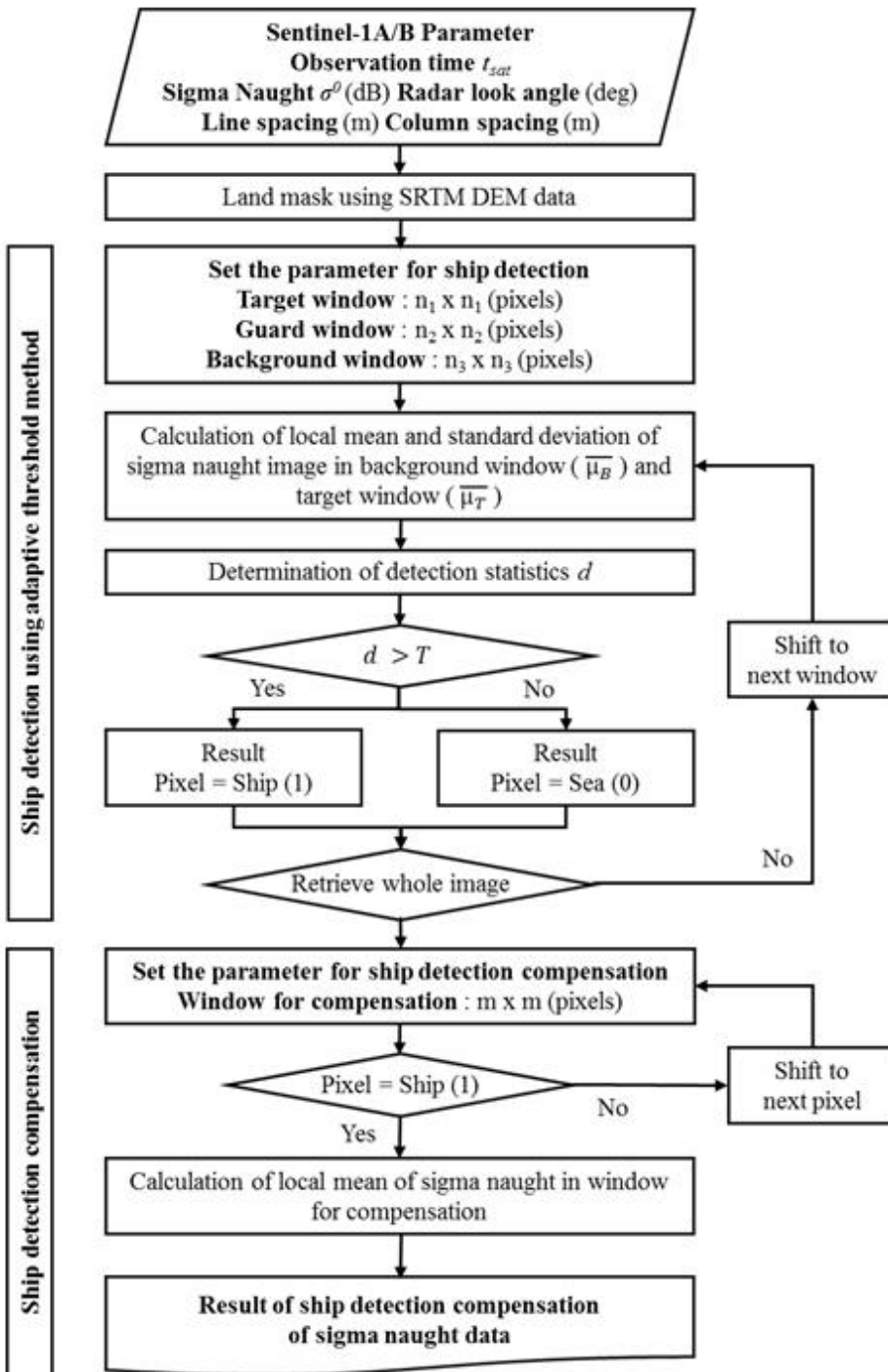


Figure 3. Flow chart for ship detection and compensation process from Sentinel-1A/B IW mode data using the adaptive threshold method

### 3.2. 해상풍 산출 방법

Sentinel-1A/B 자료로부터 해상풍을 산출하기 위해서는 각 화소에 대한 후방산란계수, 입사각을 산출하고, SAR의 관측각에 대한 바람의 상대적인 방향 정보가 필요하다(Figure 4). SAR 영상 자체에서 영상 특성을 기반으로 풍향을 산출하는 방법도 존재하지만, SAR 영상 내 해양 영역에서의 기름, 대기 중력파, 내부파(internal wave), 강수 지역(rain cell) 등이 존재하는 경우, 후방산란계수의 분포 특성에 영향을 주기 때문에 정확한 풍향 정보를 산출하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 일관된 외부 입력 자료로부터 풍향 정보를 산출하여 SAR 자료에 대입하는 방법을 적용하였으며, ECMWF 재분석 바람장 자료를 사용하였다.

SAR 영상을 기반으로 해상풍을 산출하는 방법은 산란계 관측값을 기반으로 개발된 GMFs를 사용한다. GMFs는 후방산란계수, 입사각, 바람의 상대적인 방향에 따른 풍속을 관계식으로 나타낸 함수로, 레이더가 사용하는 파장과 편파에 따라 달라진다. 본 연구에서 사용하는 Sentinel-1A/B 수직 이중 편파 자료는 C-Band SAR를 이용하여 산출된 자료이기 때문에 C-Band SAR의 VV 편파 자료를 기반으로 개발된 CMOD를 적용하였다. CMOD 알고리즘의 종류로는 기존 해상풍 정확도 연구에서 사용되는 CMOD4, CMOD\_IFR2, CMOD5, CMOD5.N 알고리즘이 있다. Table 3은 기존 연구를 기반으로 사용한 위성자료에 따른 각 알고리즘별 정확도를 나타낸 표로, 각 알고리즘은 SAR 탑재 위성 및 자료 처리 방법, 입력 자료에 따라 달라지지만, 정확도가 1.37 m/s에서 3.47 m/s까지 이른다(Horstmann et al., 2002; Beaucage et al., 2007; Lin et al., 2008; Xu et al., 2010; Yang et al., 2011; Komarov et al., 2012; Zhang et al., 2012; Komarov et al., 2014). 추가적으로 Verspeek, J. et al. (2012)는 CMOD5.N 알고리즘에서 입사각에 의한 잔차 수정항을 추가하여 CMOD5.Na 알고리즘을 제안하였고, 본 연구에서는 기존의 C-Band SAR 자료 기반 해상풍 산출 알고리즘별 정확도를 비교하기 위해 CMOD4, CMOD\_IFR2, CMOD5, CMOD5.N, CMOD5.Na 알고리즘을 모두 적용하였다.

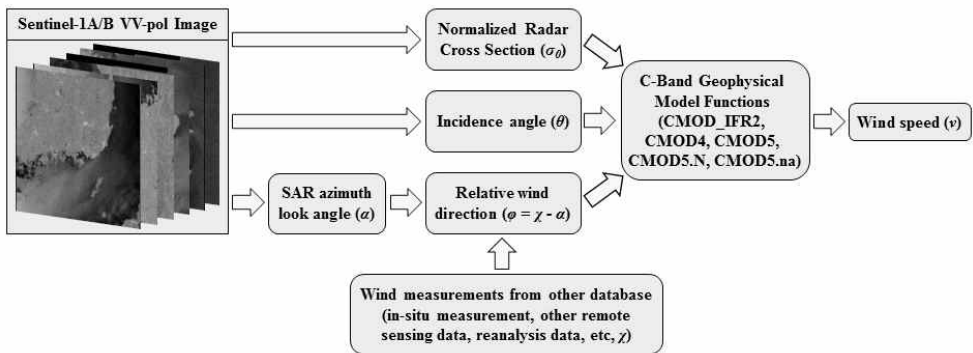


Figure 4. Flow diagram for sea surface wind retrieval from radiometric calibrated Sentinel-1A/B IW mode data in vertical-vertical (VV)-polarization

Table 3. List of accuracy of geophysical model functions such as CMOD4, CMOD\_IFR2, CMOD5, and CMOD5.N based on previous research and satellite onboard C-Band SAR

Authors	Satellite	Accuracy of GMFs			
		CMOD4	CMOD_IFR2	CMOD5	CMOD5.N
Lin, H. et al (2008)	ENVISAT ASAR (VV-polarized)	1.74 m/s	2.02 m/s	2.14 m/s	–
Xu, Q. et al (2010)	ENVISAT ASAR (VV-polarized)	1.45 m/s	1.58 m/s	1.51 m/s	–
Horstmann, J. et al (2002)	Radarsat-1 (HH-polarized)	3.47 m/s	–	–	–
Beaucage, P. et al (2007)	Radarsat-1 (HH-polarized)	–	2.07 m/s	–	–
Yang, X. et al (2011)	Radarsat-1 (HH-polarized)	–	–	1.65 m/s	–
Komarov, S. et al (2012)	Radarsat-2 (VV-polarized)	–	1.13 m/s - 1.52 m/s	–	–
Zhang, B. et al (2012)	Radarsat-2 (VV-polarized)	1.42 m/s	1.40 m/s	1.39 m/s	1.37 m/s
Komarov, A. et al (2014)	Radarsat-2 (VV-polarized)	–	2.23 m/s - 2.62 m/s	–	1.95 m/s - 2.40 m/s

CMOD4 알고리즘은 ERS-1 산란계 관측 자료와 ECMWF 재분석 바람장 자료, NOAA 부이 자료를 기반으로 개발된 C-Band VV 편파 경험식으로, 입사각 및 바람장에 따른 후방산란계수 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma^0(dB) = 10\log_{10}(b_0(1 + b_1\cos\phi + b_3\tanh b_2\cos 2\phi)^{1.6}) \quad (2)$$

$$b_0 = b_r \times 10^{\alpha + \gamma f_1(V + \beta)} \quad (3)$$

$$b_1 = c_{10}P_0 + c_{11}V + (c_{12}P_0 + c_{13}V)f_2(x) \quad (4)$$

$$b_2 = c_{14}P_0 + c_{15}(1 + P_1)V \quad (5)$$

$$b_3 = 0.42[1 + c_{16}(c_{17} + x)(c_{18} + V)] \quad (6)$$

$$b_r = LUT(\theta) \quad (7)$$

$\sigma^0$ 는 dB단위의 후방산란계수,  $\theta$ 는 입사각,  $\phi$ 는 SAR의 관측각에 대한 바람의 상대적인 방향,  $V$ 는 풍속을 나타내며,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ 는 Legendre 다항식으로 총 18개의 계수로 표현되고,  $b_r$ 은 잔차 수정항으로 순람표(look up table)로 정리되어 있다.

CMOD\_IFR2 알고리즘은 ERS 산란계의 비직결 처리과정(off-line processing)과 실측 부이 자료와의 비교 결과를 기반으로 개발된 C-Band VV 편파 경험식으로, 입사각 및 바람장에 따른 후방산란계수 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma^0(dB) = 10\log_{10}(10^{\alpha + \beta\sqrt{V}} \times (1 + b_1\cos\phi + \tanh b_2\cos 2\phi)) \quad (8)$$

$$\alpha = c_1 + c_2 P_1 + c_3 P_2 + c_4 P_3 \quad (9)$$

$$\beta = c_5 + c_6 P_1 + c_7 P_2 \quad (10)$$

$$b_1 = c_8 + c_9 V_1 + c_{10} P_1 + c_{11} P_1 V_1 + c_{12} P_2 + c_{13} P_2 V_1 \quad (11)$$

$$b_2 = c_{14} + c_{15} P_1 + c_{16} P_2 + (c_{17} + c_{18} P_1 + c_{19} P_2) V_1 + (c_{20} + c_{21} P_1 + c_{22} P_2) V_2 + (c_{23} + c_{24} P_1 + c_{25} P_2) V_3 \quad (12)$$

$$V = V_m + V_{bias} \quad (13)$$

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ 는 총 25개의 계수로 표현되는 함수이다.  $V_m$ 은 CMOD\_IFR2 알고리즘에 의해 계산된 풍속,  $V_{bias}$ 는 풍속에 따른 잔차로, 높은 풍속에서의 편향을 수정하는 항이 추가되었고, 풍속에 따라  $V_{bias}$  값은 변화한다.

CMOD5 알고리즘은 ERS-2 산란계 자료와 ECMWF 수치 모델 자료를 비교하여 개발된 함수로, CMOD4 알고리즘이 입사각이 작은 경우에는 25 m/s 보다 높은 풍속에서는 후방산란계수가 감소하고, 높은 풍속 조건에서는 후방산란계수를 과대 추정하는 단점을 보완하였다. C-Band VV 편파 경험식으로, 입사각 및 바람장에 따른 후방산란계수 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma^0(dB) = 10 \log_{10} (B0(1 + B1 \cos \phi + B2 \cos 2\phi)^{1.6}) \quad (14)$$

$$B0 = 10^{a_0 + a_1 v} f(a_2 v, s_0)^\gamma \quad (15)$$

$$B1 = \frac{c_{14}(1+x) - c_{15}v(0.5+x - \tanh 4a_3)}{1 + \exp(0.34(v - c_{18}))} \quad (16)$$

$$B2 = (-d_1 + d_2v_2)\exp(-v_2) \quad (17)$$

$B0$ ,  $B1$ ,  $B2$ 는 총 28개의 계수로 표현된 함수값을 나타낸다.

CMOD5.N 알고리즘은 비 중성(non-neutral) 표면 바람을 산출하기 위해 개발된 CMOD5 알고리즘을 수정하여 중성 표면 바람을 산출하기 위해 개발한 알고리즘으로, ASCAT과 ERS-2 산란계 자료와 ECMWF 수치 모델 자료를 비교하여 개발되었다. CMOD5.N 알고리즘의 관계식은 CMOD5 알고리즘과 동일하고, CMOD5 알고리즘 관계식에 사용되는 28개의 계수를 조정하였다.

CMOD5.Na 알고리즘은 CMOD5.N 알고리즘에서 풍속의 규모를 결정하는 변수에 입사각에 의한 잔차가 존재함을 증명하고, 이를 수정한 알고리즘이다. ASCAT 산란계 자료와 ECMWF 수치 모델 자료를 비교하여 개발되었다. CMOD5.N 알고리즘과 관계식은 동일하지만 입사각에 의한 잔차 수정항을 추가한 형태로, 관계식은 다음과 같다.

$$CMOD5.Na = CMOD5.N + B0^{corr}(\theta) \quad (18)$$

$B0^{corr}(\theta)$ 는 잔차 수정항으로 입사각에 대해 경험적으로 도출된 3차 다항식으로 표현된다.



### 3.3. 10 m 해상풍 환산

Sentinel-1A/B 자료를 이용하여 산출한 해상풍의 정확도를 평가하기 위해서 기상청 해양 기상 부이 실측 자료를 사용하였다. 산란계와 SAR 자료를 이용하여 산출하는 해상풍은 해수면 기준 10 m 높이에서의 해상풍을 의미하고, 기상청 해양 기상 부이는 3.6 m에서 4.3 m 범위의 높이에서 해상풍을 측정한다. Sentinel-1A/B 자료를 이용하여 산출한 해상풍과 정확도 평가 기준 자료의 해상풍은 의미하는 높이가 다르기 때문에 실측 자료를 기반으로 실측 해상풍을 변환하는 과정이 필요하다. 실측 해상풍을 10 m 높이에서의 해상풍으로 변환하기 위해서 사용한 모델은 대기와 해양 환경에 따른 대기-해양 경계층을 잘 모의하는 것으로 알려진 Liu-Katsaros-Businger (LKB) 모델이다(Liu et al, 1979; Liu and Tang, 1996).

LKB 모델은 풍속, 기온, 습도의 관측 높이와 해수면 온도, 기온, 습도, 기압, 풍속의 실측값을 이용하여 특정 높이의 풍속을 산출할 수 있도록 설계되었고, 관계식은 다음과 같다(Figure 5).

$$\frac{u - u_s}{u_*} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_u}\right) - \Psi_u}{k} \quad (19)$$

$$\frac{T - T_s}{T_*} = \frac{K_M \left( \ln\left(\frac{z}{z_T}\right) - \Psi_T \right)}{K_H \times k} \quad (20)$$

$$\frac{q - q_s}{q_*} = \frac{K_M \left( \ln\left(\frac{z}{z_q}\right) - \Psi_q \right)}{K_E \times k} \quad (21)$$

$u$ ,  $T$ ,  $q$ 는 구하고자 하는 높이에서의 풍속, 기온, 습도,  $u_s$ ,  $T_s$ ,  $q_s$ 는 해수면에서의 풍속, 기온, 습도,  $u_*$ ,  $T_*$ ,  $q_*$ 는 해수면에서의 마찰에 의해 발생하는 속도, 온도, 습도,  $z$ 는 구하고자 하는 높이,  $z_u$ ,  $z_T$ ,  $z_q$ 는 풍속, 온도, 습도의 관측 높이를 나타낸다.  $\Psi_u$ ,  $\Psi_T$ ,  $\Psi_q$ 는 유체의 특성을 나타내는 변수로 Businger-Dyer 모델에 의해 대기의 성층 정도를 반영하고,  $k$ 는 Von Karman 상수,  $K_M$ ,  $K_H$ ,  $K_E$ 는 운동량(momentum), 열, 습도에 따른 난류확산계수(turbulent diffusivity)를 의미한다.

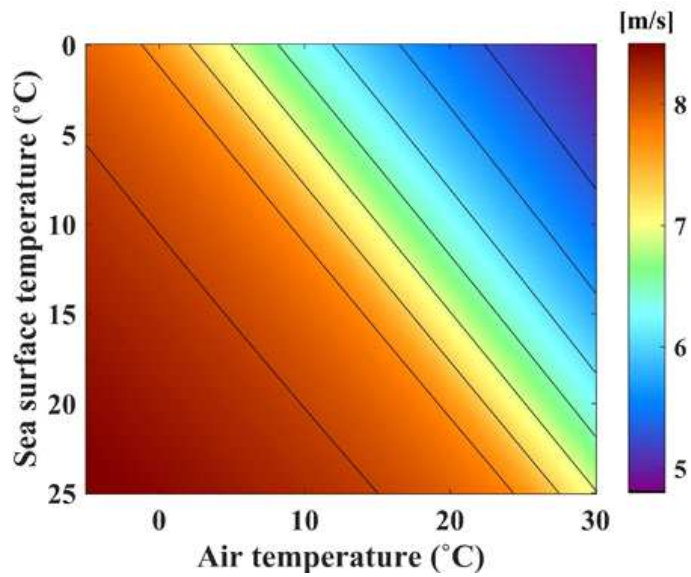


Figure 5. Simulation of 10-m height wind speed retrieval from LKB model as a function of air temperature and sea surface temperature at a given wind speed (7 m/s), observation height of wind (3.9 m), humidity (0.8), observation height of humidity (3.6 m), air pressure (1013 hPa), and observation height of air temperature (3.4 m)

### 3.4. 이중 편파 SAR 자료의 Pol-SAR 분해(decomposition)

SAR는 마이크로파를 송신하여 지표면에서의 산란을 통해 돌아오는 에너지를 측정하고, 수신된 에너지는 지표면의 산란 및 편파 특성에 관한 정보를 포함한다. Pol-SAR 분해는 이러한 SAR 자료의 측정 원리를 기반으로 산란 및 편파 특성을 분석하고, 산란 및 편파 특성에 따라 지표면에 분포하는 물질을 분류하는 방법을 가리킨다. SAR 영상 내 해양 영역에는 잔잔한 해수만 존재하는 것이 아니라, 선박의 이동으로 인해 생기는 선박 후류(ship wake), 선박 및 해양 생물의 기름 등 다양한 요소들이 존재한다. 이러한 요소들은 해양 표면의 거칠기(roughness)를 변화시켜 SAR에서 측정되는 후방산란계수에 영향을 준다. 선박 후류의 경우 후방산란계수 분포를 기반으로 탐지 가능하지만, 선박 및 해양 생물의 기름의 경우 후방산란계수 분포를 기반으로 탐지하기에는 한계가 있다. 하지만, 선박 및 해양 생물의 기름은 해수와는 산란 및 편파 특성이 다르기 때문에 Pol-SAR 분해를 이용하면 SAR 영상 내 해양 영역에서 분류하는 것이 가능하다(Nunziata et al., 2013; Zhang et al., 2014). 본 연구에서는 이러한 요소들이 Sentinel-1A/B 영상 내 존재하는 것을 보여주고, 해상풍 산출의 오차 요인 가능성을 보이기 위해서 SAR 자료의 편파 특성을 이용한 분류 방법을 적용하였다.

SAR 자료는 산란 벡터(scattering vector)로 저장이 되고, 사중 편파 SAR 자료의 산란 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \begin{pmatrix} \dot{S}_{HH} e^{j\phi_{HH}} & \dot{S}_{HV} e^{j\phi_{HV}} \\ \dot{S}_{VH} e^{j\phi_{VH}} & \dot{S}_{VV} e^{j\phi_{VV}} \end{pmatrix} \quad (22)$$

$\dot{S}_{HH}$ ,  $\dot{S}_{HV}$ ,  $\dot{S}_{VH}$ ,  $\dot{S}_{VV}$ 는 각각 HH 편파, HV 편파, VH 편파, VV 편파에 해당하는 산란 벡터이고,  $\phi_{HH}$ ,  $\phi_{HV}$ ,  $\phi_{VH}$ ,  $\phi_{VV}$ 는 각각 HH 편파, HV 편파, VH편파, VV 편파에 해당하는 위상 각(phase angle)이다.

본 연구에서는 Sentinel-1A/B IW 모드 수직 이중 편파 자료를 사용하기 때문에 산란 벡터의 배열을 수직 이중 편파 자료에 적합하도록 변환해야 하고, 그에 따른 산란 벡터는 다음과 같이 정의된다(Cloude, 2007; Velotto et al., 2016).

$$k = (S_{VV} \ S_{VH})^T \quad (23)$$

$k$ 는 표적 벡터(target vector)로, 산란 벡터를 나열한 벡터이고,  $T$ 는 행렬의 전치(transpose)를 의미한다. 표적 벡터를 이용하여 간섭성(coherency)을 산출하고 직교 대각화(orthogonal diagonalizability) 정리를 적용하면 다음과 같이 정리된다.

$$T_2 = \langle k \cdot k^T \rangle = (v_1 \ v_2) \begin{pmatrix} \lambda_1 & \\ & \lambda_2 \end{pmatrix} (v_1 \ v_2)^T \quad (24)$$

$v_1, v_2$ 는 고유 벡터(eigenvector),  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 고유 값(eigenvalue)를 가리킨다( $\lambda_1 > \lambda_2$ ). 이렇게 산출한 고유 벡터와 고유 값을 이용하여 Pol-SAR 분해를 위한 변수 산출이 가능하고, 관계식은 다음과 같다.

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^2 \lambda_i} \quad (i = 1, 2) \quad (25)$$

$$\alpha_i = \cos^{-1}(|v_{1i}|) \quad (i = 1, 2) \quad (26)$$

$$H = - \sum_{i=1}^2 p_i \log_2 p_i \quad (27)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^2 p_i \alpha_i \quad (28)$$

$$A = \frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2} \quad (29)$$

$p_i$ 는 확률분포(probability),  $H$ 는 엔트로피(entropy),  $\alpha$ 는 산란각(scattering angle) 또는 mean alpha angle,  $A$ 는 비등방성(anisotropy)을 의미한다(Xie et al., 2013). 일반적으로 기름 영역에서는 해양 영역보다 엔트로피, 산란각이 높고, 비등방성은 낮은 것으로 나타난다(Velotto et al., 2012; Singha et al., 2016).

## 4. 연구 결과

### 4.1. 일치점 데이터베이스

2015년 5월 1일부터 2017년 9월 30일까지 총 395 장의 Sentinel-1A/B IW 모드 수직 이중 편파 자료를 수집하였고, 기상청 해양 기상 부이와 공간 거리는 20 m 이내, 시간 차는 1시간 이내를 만족하는 자료를 선별하여 일치점 데이터베이스로 구축하였다. 우리나라 주변 해역을 포함한 IW 모드 수직 이중 편파 자료는 Sentinel-1A가 관측을 시작한 2014년 4월부터 2015년 4월까지 수집되지 않았지만, 2015년 5월부터는 지속적으로 수집되고 있으며, 2017년 2월부터는 매달 15 장 이상의 자료가 생산되고 있다(Figure 6(a)). 일치점 데이터베이스의 해수면 온도 분포는 3 °C에서 30 °C까지 나타났으며, 15 °C에서 18 °C 구간에서 가장 많은 빈도수가 나타났다(Figure 6(b)). 대기-해양 경계층의 안정도를 나타내는 해수면 온도와 기온의 차이 분포는 -5 °C에서 17 °C까지 나타났고, 0 °C에서 2 °C 구간에서 가장 많은 빈도수가 나타났다(Figure 6(c)). 상대 습도의 분포는 30%에서 100%까지 나타났으며, 80%에서 97.5% 구간에서 가장 많은 빈도수가 나타났다(Figure 6(d)). 풍속의 분포는 0 m/s에서 18 m/s까지 나타났고, 10 m/s 이하 구간에서 가장 많은 빈도수가 나타났다. 풍향은 모든 방향에 대해 분포하였고, 북서풍의 빈도수가 가장 많은 것으로 나타났다(Figure 6(e)).

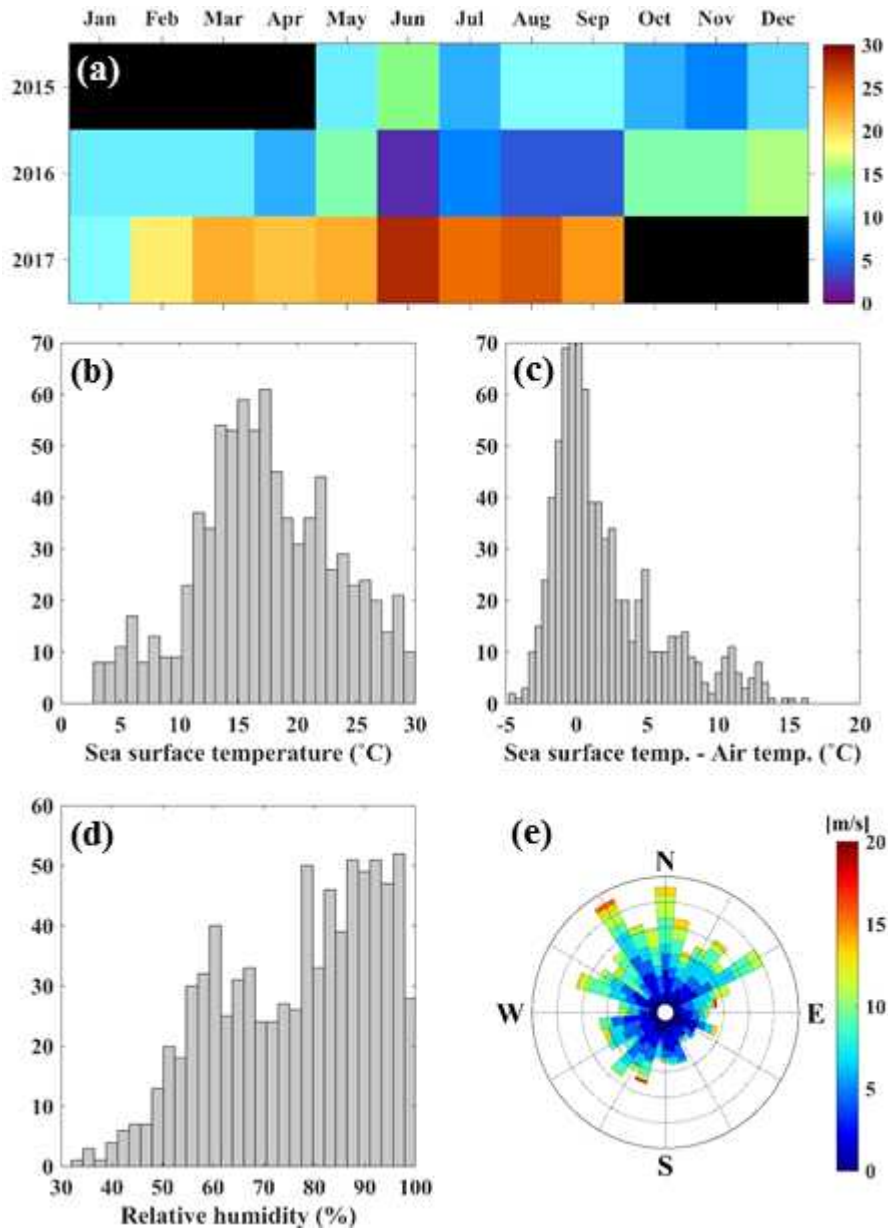


Figure 6. Characteristics of matchup database, (a) the number of matchup data on that time from May 1, 2015 to September 30, 2017, the distribution of (b) sea surface temperature, (c) sea surface temperature minus air temperature, (d) relative humidity, and (e) wind vector in meteorological convention of matchup data



## 4.2. 해상풍 산출 정확도

CMOD4, CMOD\_IFR2, CMOD5, CMOD5.N, CMOD5.Na 알고리즘을 사용하여 해상풍을 산출하고 기상청 해양 기상 부이 실측 자료를 10 m 높이에서의 해상풍으로 변환하여 정확도를 평가하였다. Sentinel-1A/B IW 모드 수직 이중 편파 자료로 산출한 해상풍 자료는 알고리즘에 관계없이 전체적으로 실제 해상풍을 잘 모의하는 것으로 나타났다. CMOD4, CMOD5, CMOD5.N, CMOD5.Na 알고리즘은 실제 해상풍이 5 m/s 이하의 영역에서는 해상풍을 과대 추정하는 경향이 보여 바람이 약한 부분에서 자료가 결핍되는 현상이 나타났고, 실제 해상풍이 5 m/s 이상의 영역에서는 해상풍을 과소 추정하는 경향이 보였지만 자료의 결핍을 보이지는 않았다. 약한 바람 조건에서의 결핍은 CMOD4 알고리즘을 적용하였을 때 가장 뚜렷하게 나타났다. 다른 알고리즘에 비해 CMOD\_IFR2 알고리즘은 실제 해상풍이 5 m/s 이하의 영역에서 과대 추정하는 경향이 약하게 나타났고, 5 m/s 이상의 영역에서도 과소 추정하는 경향이 뚜렷하지 않았다(Figure 7).

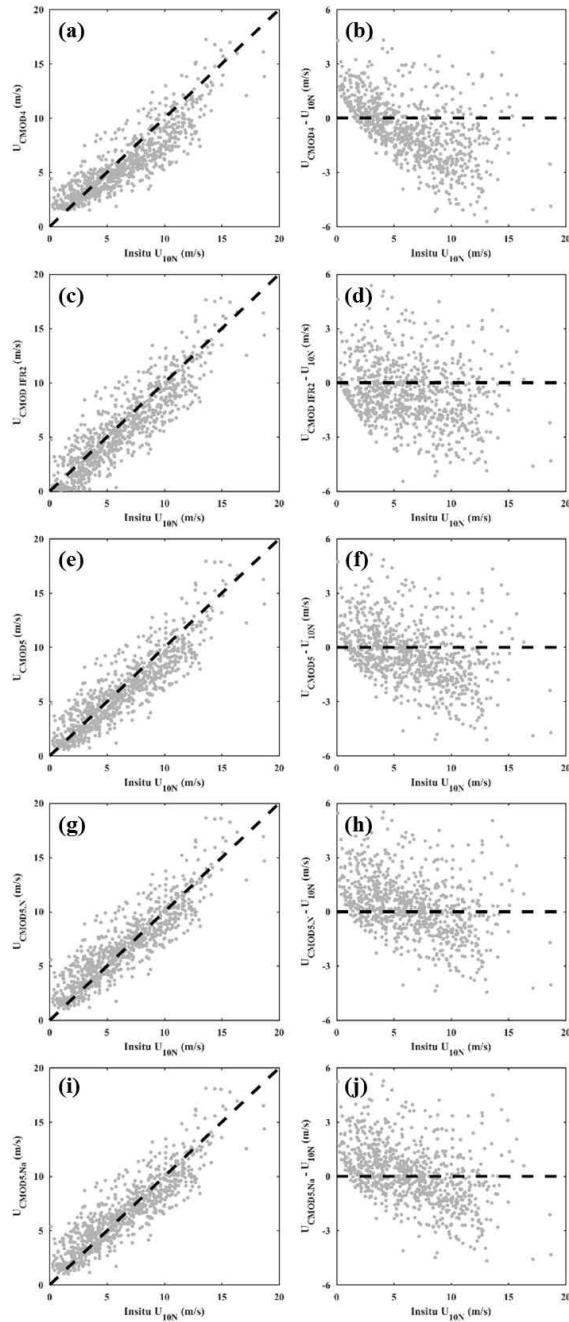


Figure 7. Scatter plot of in-situ wind speed versus estimated wind speed and in-situ wind versus wind speed difference from Sentinel-1A/B IW mode data using (a), (b) CMOD4, (c), (d) CMOD\_IFR2, (e), (f) CMOD5, (g), (h) CMOD5.N, and (i), (j) CMOD5.Na, respectively

Sentinel-1A/B IW 모드 수직 이중 편파 자료를 사용하여 산출한 해상풍의 해역별 특징을 분석하기 위해서 기상청 해양 기상 부이의 분포 위치에 따라 덕적도, 외연도, 인천, 칠발도, 신안, 부안 6개 부이는 황해 영역으로, 마라도, 서귀포, 거문도, 추자도, 거제도, 통영 6개 부이는 남쪽 해역으로, 포항, 울산, 울진, 울릉도-독도, 동해 5개 부이는 동해 영역으로 분류하여 해상풍 산출 정확도를 비교하였다(Figure 8). 동해 영역과 남쪽 해역에서는 CMOD5.N과 CMOD5.Na 알고리즘을 적용하여 해상풍을 산출하였을 때 다른 알고리즘보다 Root Mean Square Error (RMSE)와 편향의 절대값이 작아 실제 해상풍을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 황해 영역에서는 CMOD5 알고리즘이 RMSE가 1.54 m/s, 편향이 0.17 m/s로 나타나 다른 알고리즘보다 실제 해상풍을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 황해 영역에서는 알고리즘에 상관없이 다른 해역에서보다 편향이 증가하는 경향이 나타났고, 다른 해역에서 좋은 정확도와 작은 편향을 보였던 CMOD5.N과 CMOD5.Na 알고리즘은 RMSE가 1.68 m/s - 1.76 m/s, 편향이 0.71 m/s - 0.87 m/s으로 나타나 황해 해역에서는 정확도가 감소하고, 과대 추정하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. CMOD\_IFR2 알고리즘은 해역에 관계없이 전체적으로 편향이 -0.80 m/s - -0.20 m/s로 나타나 과소 추정하는 경향이 나타났다. 상관 계수(correlation coefficient)는 해역에 상관없이 CMOD5.Na 알고리즘이 가장 높은 것으로 나타났다. 전체 해역을 기준으로 CMOD5.Na 알고리즘은 RMSE가 1.65 m/s, 편향이 0.14 m/s, 상관 계수는 0.8910으로 나타나 다른 알고리즘보다 실제 해상풍을 잘 모의하는 것으로 나타났다(Table 4).

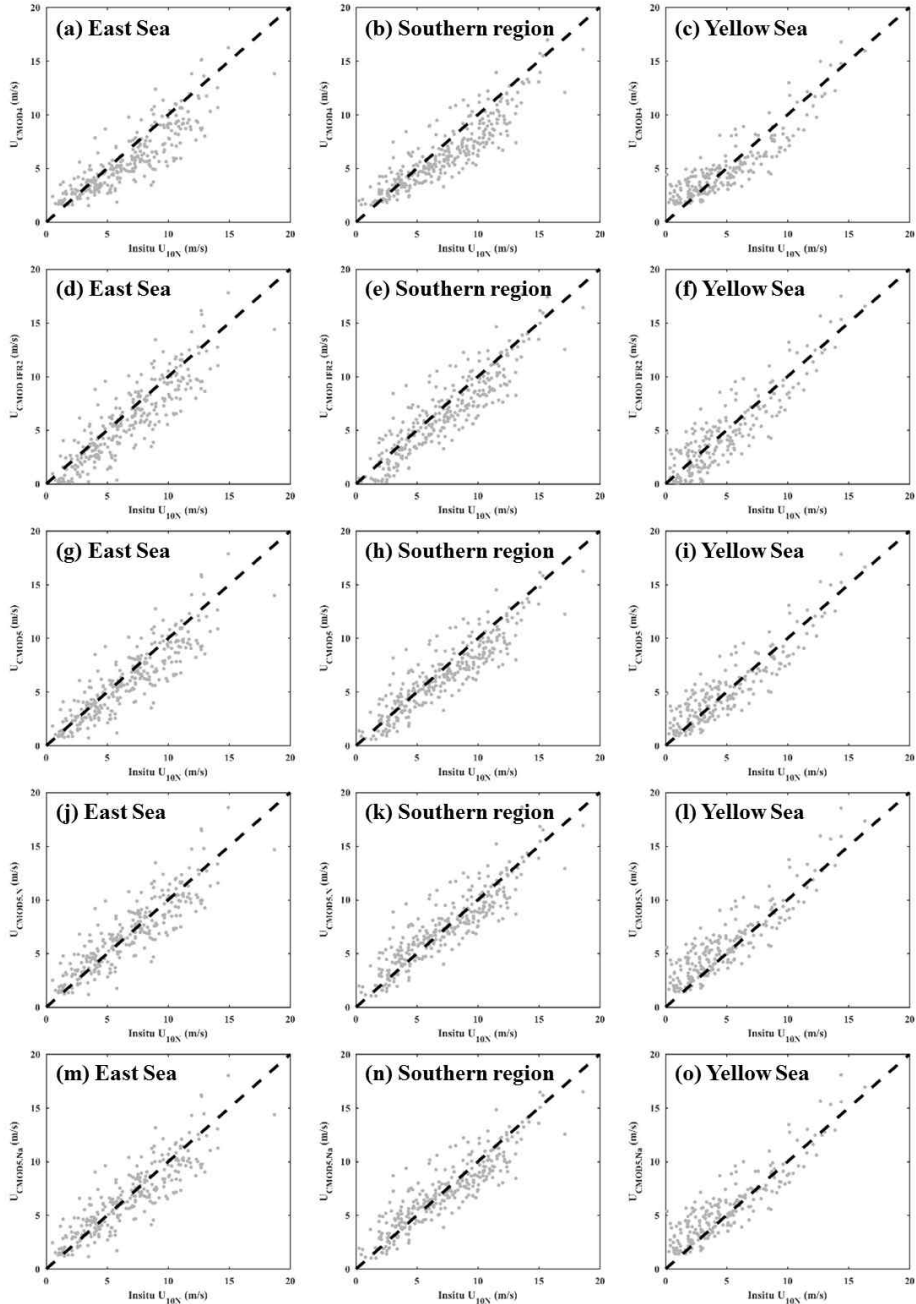


Figure 8. Scatter plot of in-situ wind speed versus estimated wind speed from Sentinel-1A/B IW mode data using (a), (b), (c) CMOD4, (d), (e), (f) CMOD\_IFR2, (g), (h), (i) CMOD5, (j), (k), (l) CMOD5.N, and (m), (n), (o) CMOD5.Na in East Sea, Southern region, and Yellow Sea, respectively

Table 4. Accuracy of sea surface wind retrieval from Sentinel-1A/B IW mode data by C-Band Geophysical Model Functions (GMFs) such as CMOD4, CMOD\_IFR2, CMOD5, CMOD5.N and CMOD5.Na, and Corr. indicates correlation coefficient

Region		East Sea	Southern region	Yellow Sea	Total
Number of matchup		277	308	222	807
CMOD4	RMSE (m/s)	1.93	1.91	1.56	1.83
	Bias (m/s)	-0.91	-0.88	0.04	-0.64
	Corr.	0.8662	0.8837	0.8890	0.8815
CMOD_IFR2	RMSE (m/s)	1.94	1.80	1.68	1.82
	Bias (m/s)	-0.80	-0.67	-0.20	-0.59
	Corr.	0.8717	0.8911	0.8850	0.8870
CMOD5	RMSE (m/s)	1.79	1.70	1.54	1.69
	Bias (m/s)	-0.64	-0.54	0.17	-0.38
	Corr.	0.8749	0.8948	0.8946	0.8906
CMOD5.N	RMSE (m/s)	1.68	1.62	1.76	1.68
	Bias (m/s)	0.05	0.15	0.87	0.31
	Corr.	0.8749	0.8944	0.8944	0.8903
CMOD5.Na	RMSE (m/s)	1.67	1.61	1.68	1.65
	Bias (m/s)	-0.13	-0.04	0.71	0.14
	Corr.	0.8753	0.8951	0.8952	0.8910

### 4.3. 해상풍 산출 오차 분석

#### 4.3.1. 수심의 영향

Sentinel-1A/B IW 모드 수직 이중 편파 자료를 이용하여 해상풍을 산출한 결과, 해역에 관계없이 실측 풍속이 5 m/s 이하의 영역에서는 과대 추정하는 경향이 나타났고, 5 m/s 이상의 영역에서는 과소 추정하는 경향이 나타났다. 실측 풍속을 2 m/s 간격으로 구간을 나누어 선형 회귀 분석을 적용하였을 때, CMOD5.Na 알고리즘의 경우, 기울기가 황해 영역에서는 -0.1724, 남쪽 해역에서는 -0.1492, 동해 영역에서는 -0.1816이 나왔다(Figure 9). 실측 풍속이 증가할수록 해상풍 산출 경향이 과대 추정에서 과소 추정으로 바뀌는 경향은 동해 영역에서 두드러지게 나타났다.

황해 영역에서는 동해 영역보다 실측 풍속에 따른 해상풍 산출 경향이 뚜렷하지 않았지만, 5 m/s 이하의 풍속에서의 과대 추정 경향이 다른 해역에 비해 강하게 나타났고, 그로 인해 다른 해역보다 해상풍 산출 편향이 크게 나타났다. 수심에 따른 해상풍 산출 오차 분석 결과 수심 40 m 이상의 해역에서는 해상풍의 평균 오차는  $\pm 1$  m/s 미만으로 과대 추정 및 과소 추정 경향이 임의적으로(randomly) 나타났지만, 수심 40 m 이하의 해역에서는 해상풍 산출시 과대 추정하는 경향이 나타났다(Figure 10).

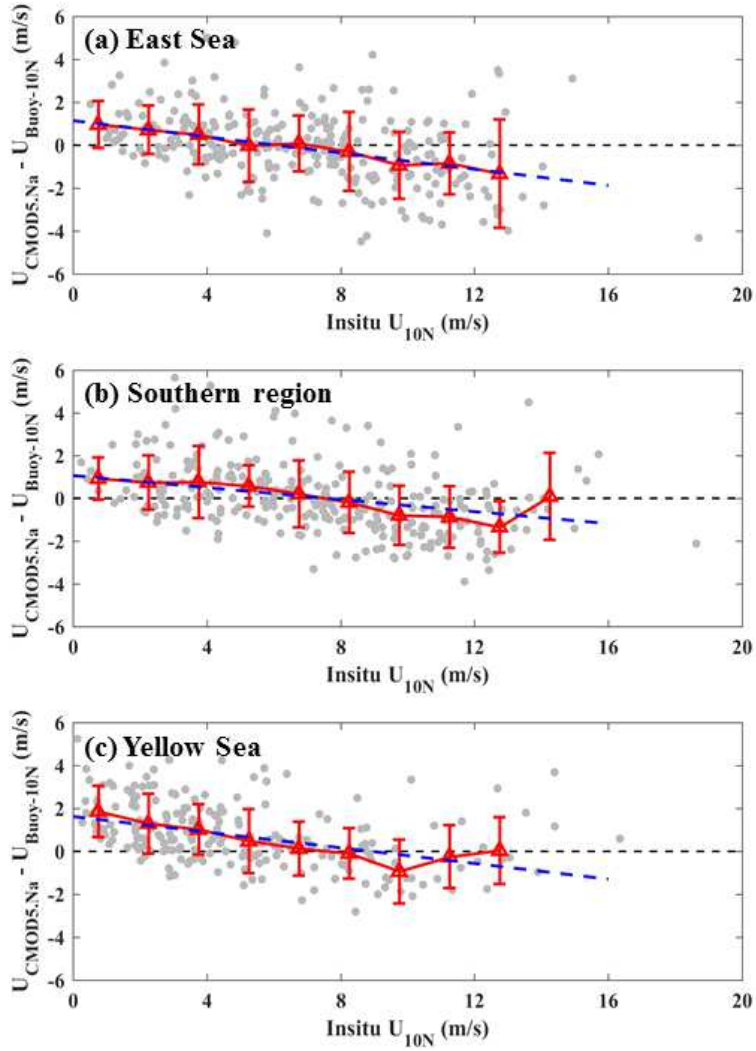


Figure 9. Tendency of wind speed difference for in-situ wind speed, red triangle and errorbar indicate mean and standard deviation of error, respectively, and dashed blue line means linear regression line of mean error, in (a) East/Japan Sea, (b) Southern region, and (c) Yellow Sea

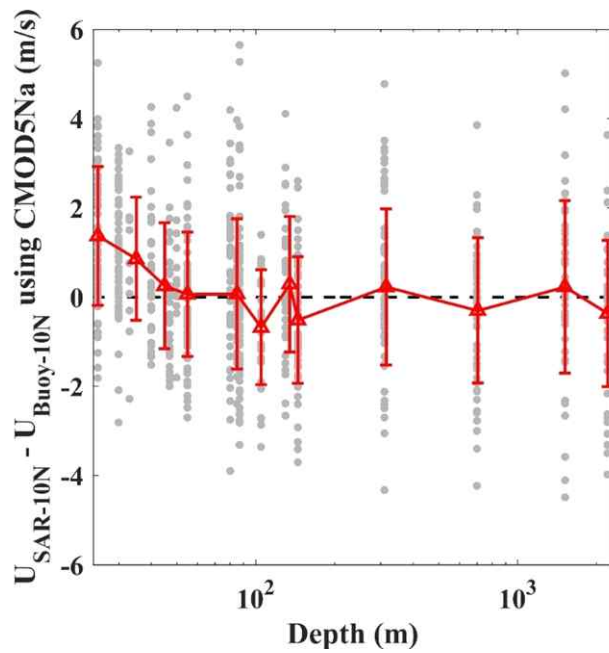


Figure 10. Scatter plot of depth of KMA marine meteorological buoy and wind speed difference, red triangle and errorbar indicate mean and standard deviation of error, respectively



약한 바람 조건에서는 파도가 약하고 해수면이 잔잔하다. 이러한 조건에서는 해수면 거칠기가 작아 SAR에서 송신한 에너지가 해수면에서 반사되어 돌아오는 에너지 양이 감소하고 SAR 영상 내에서 산출되는 후방산란계수가 감소한다. 반대로 강한 바람 조건에서는 파도가 강하기 때문에 해수면 거칠기는 증가하고, SAR에서 송신한 에너지가 해수면에서 반사되어 돌아오는 에너지 양이 증가하여 SAR 영상 내에서 산출되는 후방산란계수가 증가한다. 하지만, 수심이 얇은 해역에서는 풍속뿐만 아니라, 해저 지형에 의한 영향으로 해류에 따라 해수면 거칠기가 변화한다. 해저 지형에 존재하는 모래로 형성된 해저 산맥인 사퇴(sand ridge)가 대표적인 예이다. 모래로 구성되어 있기 때문에 해류의 세기와 방향에 따라 모양과 크기가 달라진다. 수심이 얇은 해역에 존재하는 사퇴는 광학 영상을 이용하여 관측 가능하고(Figure 11(a), (b)), 사퇴가 존재하는 해역에서는 수심이 얇고 경사에 의한 영향으로 해수의 수렴 및 발산이 발생하여 해수면 거칠기가 변화한다(Figure 11(c), (d)). 이렇게 변화된 해수면 거칠기는 SAR 영상 내 후방산란계수를 변화시켜 산출되는 바람에도 영향을 준다. 2017년 5월 6일에 관측한 Sentinel-1A/B 자료에서는 사퇴 근처 해역에서는 4.2 m/s의 풍속이 관측되었지만, 사퇴에서는 5.8 m/s의 풍속이 산출되었고, 2017년 5월 19일에 관측한 Sentinel-1A/B 자료에서는 사퇴 근처 해역에서는 3.6 m/s의 풍속이 관측되었지만, 사퇴에서는 6.8 m/s의 풍속이 산출되었다(Figure 11(d), (e)). 해저 지형에 의해 변화된 후방산란계수를 기반으로 산출한 해상풍은 관측 당시의 해상풍을 의미하지 않기 때문에 해상풍의 복합적인 구조로 인식하여 다른 해양 기작으로 해석하게 되는 원인으로 작용한다.

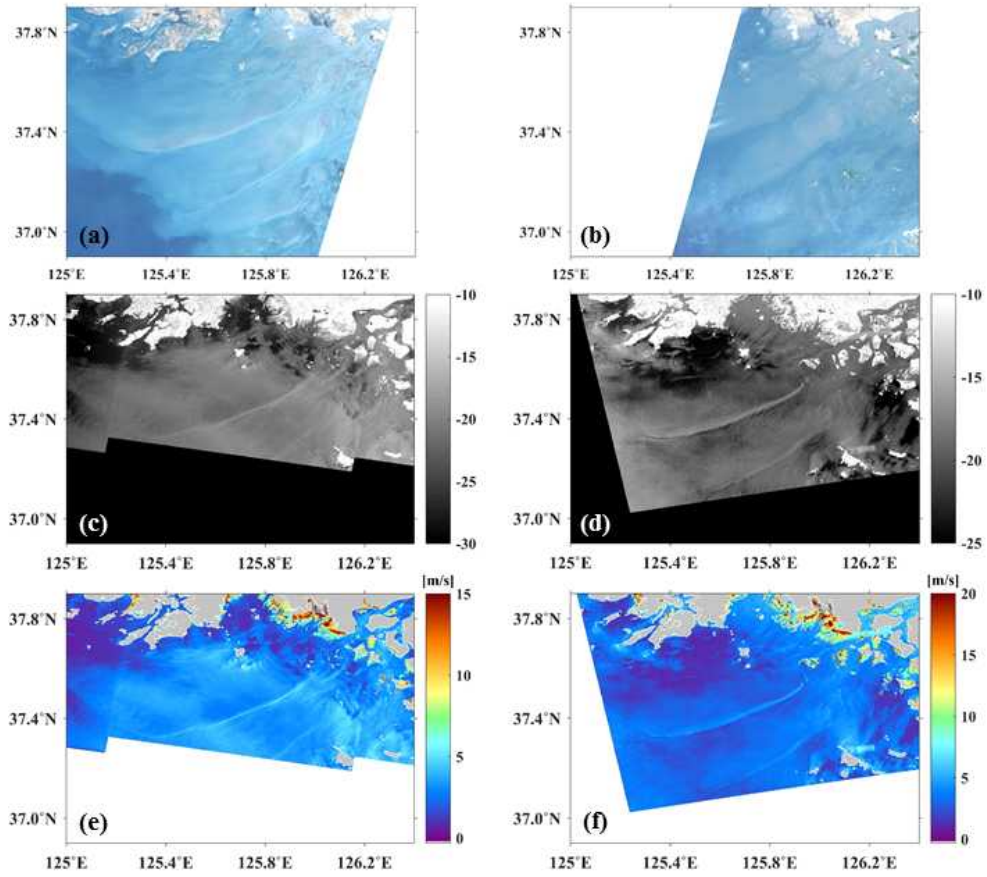


Figure 11. Effect of bathymetry on wind speed estimation from Sentinel-1A/B in shallow region, subsene of RGB composite image of Landsat-8 OLI/TIRS on (a) April 27, 2017 and (b) May 6, 2017, raw data of sigma naught from Sentinel-1B on (c) May 6, 2017 and Sentinel-1A on (d) May 19, 2017, (e) wind speed estimation from (c), and (f) wind speed estimation from (d) using CMOD5.Na

### 4.3.2. 선박의 영향

SAR 영상을 이용해서 해상풍을 산출할 때, 해양 영역에서 선박을 제거하는 전처리 과정을 거친다. 본 연구에서는 Sentinel-1A/B 영상 내 선박을 탐지하여 제거하는 방법으로 적응 임계치 방법을 적용하였다. 선박은 해양 표면과는 달리 이중 산란 및 직접 반사가 지배적으로 발생하기 때문에 SAR에서 송신한 에너지가 해수면에서 반사되어 돌아오는 에너지량이 증가하고 그로 인해 해양 영역 내에서 큰 후방산란계수를 나타낸다 (Figure 12(a)). 또한 SAR가 선박의 주변을 촬영할 때, 선박의 강한 산란의 영향으로 사이드로브 효과(side-lobe effect)이 발생한다. 사이드로브 효과는 강한 산란체로 인해 주변 화소에 영향을 줘 강한 산란체를 기준으로 주변 화소의 후방산란계수가 증가하는 현상을 의미하고, 선박의 강한 산란으로 인해 선박의 주변부로 긴 십자(十) 모양의 밝은 색 띠가 형성된다. 이는 선박의 중심으로부터 멀어질수록 후방산란계수 값이 감소하여 주변 해양 표면과 비슷한 값을 갖게 되지만, 선박 주변은 선박의 후방산란계수 값과 유사한 크기의 값을 갖게 된다. 이는 선박의 크기를 파악하는데 장애물로 작용할 뿐만 아니라 선박의 강한 산란이 주변에 영향을 주게 되어 부정확한 해상풍을 산출하게 만드는 요인으로 작용한다. 또한 선박 탐지 알고리즘을 이용하여 정확하게 선박을 제거하더라도 선박의 강한 산란으로 인해 선박을 중심으로 생기는 십자 모양의 높은 후방산란계수 흔적을 깨끗이 제거하는데 한계가 있어 흔적이 남게된다 (Figure 12(b)). 2017년 5월 25일에 관측한 Sentinel-1A 자료에서는 주변 화소에서는 1.7 m/s의 풍속이 관측되었지만, 선박 화소에서는 2.7 m/s의 풍속이 관측되었다(Figure 12(c)). SAR 영상 내에서 선박에 의한 영향을 제거하지 않고 해상풍을 산출하게 되면 선박에 의한 영향이 주변으로 퍼지게 되어 선박을 중심으로 강한 해상풍이 발생한 것처럼 표현된다. 하지만 SAR 영상 내에서 선박을 탐지하여 제거하더라도 선박의 강한 산란으로 인해 발생하는 사이드로브 효과는 완벽하게 제거하는데 한계가 있고, 이는 해상풍 산출의 오차 요인으로 작용한다.

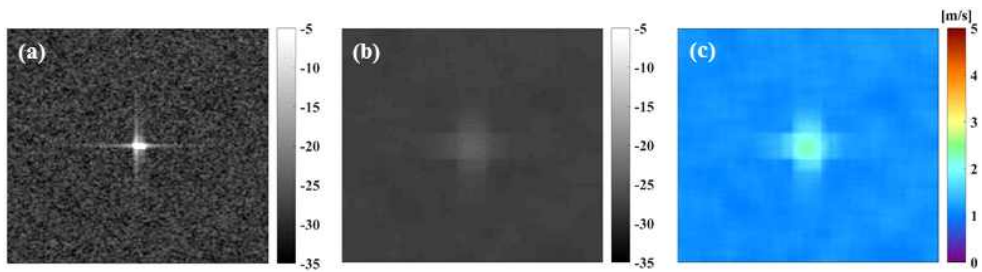


Figure 12. Effect of ship on wind speed estimation from Sentinel-1A on March 25, 2017, subscene of (a) raw data of sigma naught, (b) sigma naught averaged in 11 by 11 moving window after ship detection and compensation using adaptive threshold method from (a), (c) wind speed estimation from (b) using CMOD5.Na algorithm

### 4.3.3. 기름의 영향

해상에 존재하는 기름은 해수면 거칠기에 영향을 줘 주변 해역에서의 후방산란계수보다 작은 값을 나타낸다. 하지만 낮은 후방산란계수가 모두 기름으로 분류되는 것은 아니다. 해양 기작에 의해 특정 해역에서 해상풍이 약화되어 해수면 거칠기가 감소하거나 해저 지형이나 대기 환경에 의한 영향으로 해수의 발산 및 수렴이 발생하여 후방산란계수가 감소하는 경우도 존재한다. 기름은 해수면 거칠기를 감소시키지만, 해수와는 편파 특성이 달라 대기-해양 환경에 의해 해수면 거칠기가 감소하는 경우와 구분이 가능하다. 본 연구에서는 해상에 존재하는 기름이 해상풍 산출의 오차 요인으로 작용하는 경우를 보이기 위해 편파 특성을 기반으로 해수와 기름을 분류하였다. 2017년 4월 19일에 관측한 Sentinel-1B 자료는 선박에서 유출되는 기름을 관측하였다(Figure 13(a), (b)). 기름 떠마지막 부분에는 후방산란계수가 높고 선박으로 판별된 화소가 존재하고, 기름으로 판별된 화소는 주변 화소에 비해 낮은 풍속이 산출되는 것을 확인하였다(Figure 13(c)). 기름으로 판별된 영역은 주변 해역에 비해 높은 엔트로피(H), 낮은 비등방성(A), 높은 산란각( $\alpha$ )이 나타났다(Figure 13(d) - (f)). 2016년 4월 13일에 관측한 Sentinel-1A 자료는 해양 생물에 의해 유출된 기름을 관측하였다(Figure 14(a), (b)). 기름으로 판별된 화소는 주변 화소에 비해 낮은 풍속이 산출되는 것을 확인하였다(Figure 14(c)). 선박에서 유출되는 기름의 경우와 마찬가지로, 기름으로 판별된 영역은 주변 해역에 비해 높은 엔트로피(H), 낮은 비등방성(A), 높은 산란각( $\alpha$ )이 나타났다(Figure 14(d) - (f)).

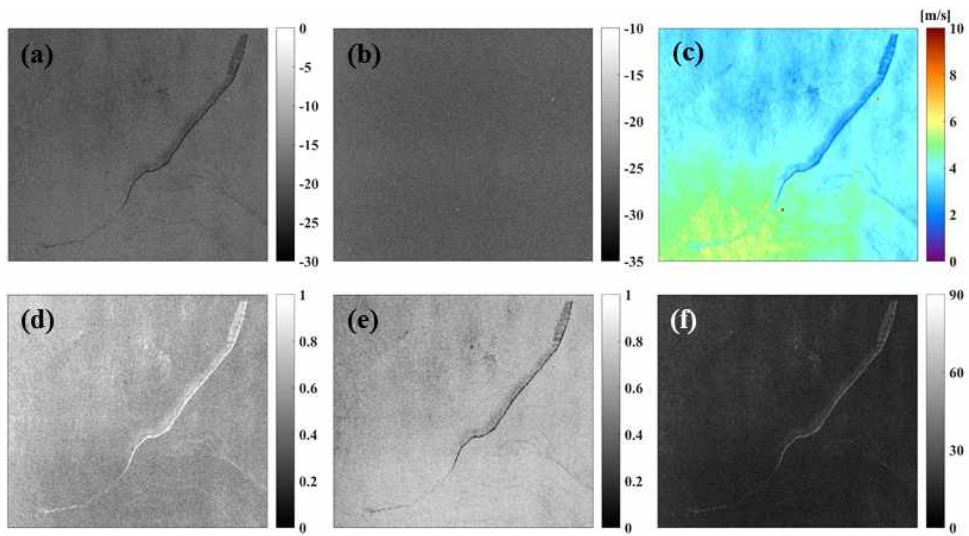


Figure 13. Effect of ship oil on wind speed estimation and polarimetric features extracted from Sentinel-1B on April 19, 2017, subscene including a ship oil of (a) VV-polarized sigma naught image, (b) VH-polarized sigma naught image, (c) wind speed estimation using CMOD5.Na algorithm from (a), (d) entropy,  $H$ , (e) Anisotropy,  $A$ , and (f) mean alpha angle,  $\alpha$

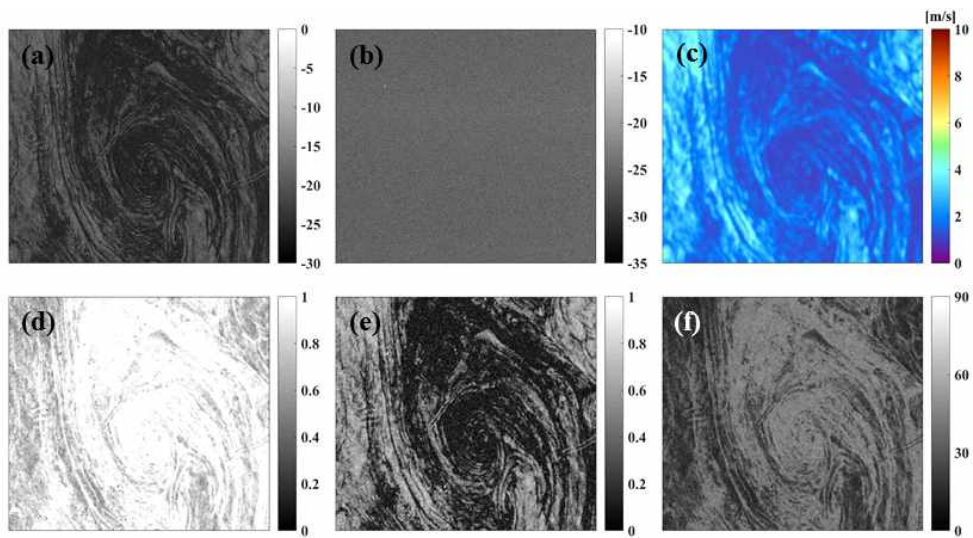


Figure 14. Effect of biogenic oil on wind speed estimation and polarimetric features extracted from Sentinel-1A on April 13, 2016, subscene including a biogenic oil of (a) VV-polarized sigma naught image, (b) VH-polarized sigma naught image, (c) wind speed estimation using CMOD5.Na algorithm from (a), (d) entropy,  $H$ , (e) Anisotropy,  $A$ , and (f) mean alpha angle,  $\alpha$

#### 4.3.4. 기타 영향

SAR 영상 내 선박이 빠른 속도로 이동할 때, 선박 이동 궤적 뒤로 V자형 모양의 높은 후방산란계수 흔적이 형성되고, V자형 안쪽으로는 낮은 후방산란계수 흔적이 형성된다. 이러한 V자형 모양의 흔적을 선박 후류라 하고, V자형 안쪽으로 낮은 후방산란계수의 흐름을 켈빈파(Kelvin wave)라 한다. 2016년 4월 30일에 관측한 Sentinel-1A 자료는 선박과 선박의 이동으로 인해 생기는 선박 후류 및 켈빈파를 관측하였다(Figure 15(a), (b)). V자형의 선박 후류 화소는 주변 화소보다 높은 풍속이 산출되었고, V자형 안쪽에 형성된 켈빈파 화소는 주변 화소보다 낮은 풍속이 산출되었다(Figure 15(c)). 선박의 이동으로 생기는 선박 후류와 켈빈파는 해수에 형성된 인위적인(artificial) 파도이기 때문에 주변 해수와 엔트로피(H), 비등방성(A), 산란각( $\alpha$ )이 유사하게 나타났다(Figure 15(d) - (f)).

대기-해양 상호작용으로 인해 형성되는 대기 중력과 해양 환경에 의해 형성되는 내부파 또한 SAR에서 측정되는 후방산란계수를 변화시킨다. 대기 중력은 대기 환경에 의해 바람의 방향을 따라서 대기의 수렴 및 발산이 발생하는 현상으로, 대기의 수렴 및 발산은 해수면 거칠기를 변화시켜 SAR에서 측정하는 후방산란계수에 영향을 미친다(Figure 16(a)). 내부파는 해양 환경에 의해 급격한 밀도 경사(pycnocline)를 따라서 해수의 수렴 및 발산이 발생하는 현상으로, 해수의 수렴 및 발산은 해수면 거칠기를 변화시켜 SAR에서 측정하는 후방산란계수에 영향을 미친다(Figure 16(b)). 이렇게 변화된 후방산란계수는 해상풍에 의한 영향뿐만 아니라 대기 중력과 및 내부파의 영향 또한 포함하게 되므로 해상풍 산출의 오차 요인으로 작용한다.



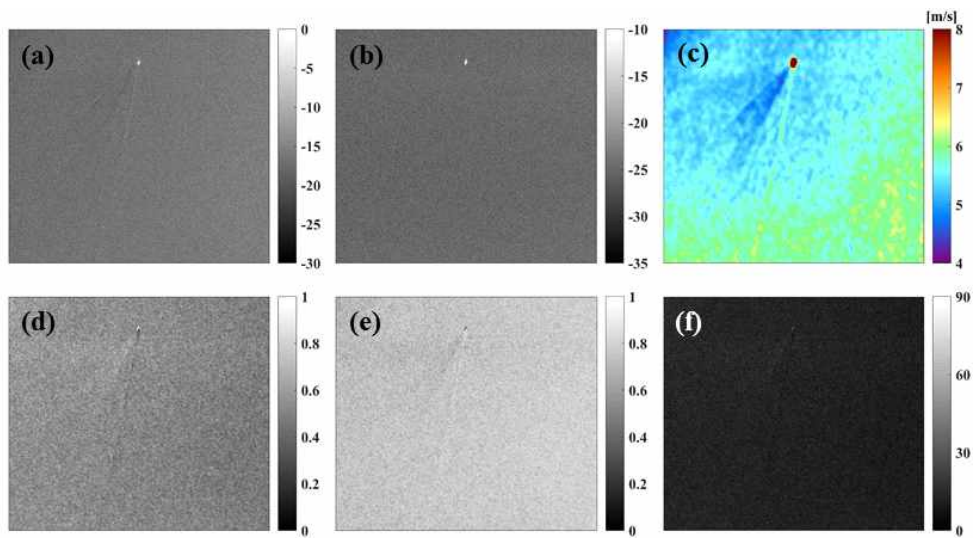


Figure 15. Effect of ship wake on wind speed estimation and polarimetric features extracted from Sentinel-1A on April 30, 2016, subsene including a ship wake of (a) VV-polarized sigma naught image, (b) VH-polarized sigma naught image, (c) wind speed estimation using CMOD5.Na algorithm from (a), (d) entropy,  $H$ , (e) Anisotropy,  $A$ , and (f) mean alpha angle,  $\alpha$

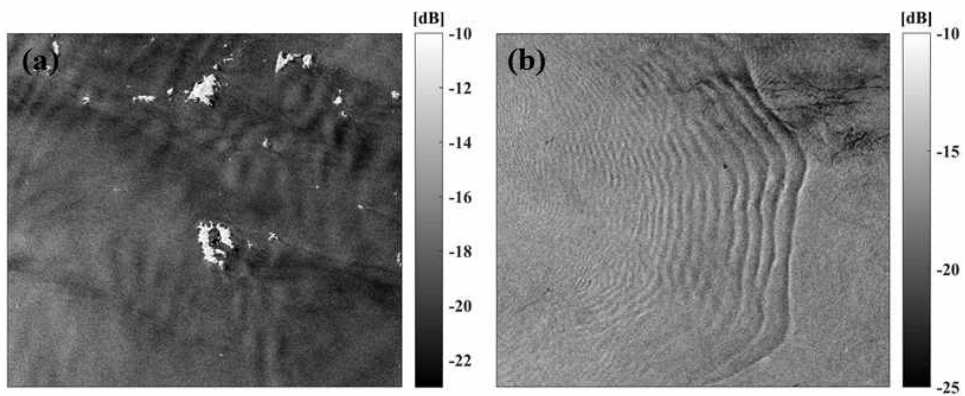


Figure 16. Effect of atmospheric gravity wave and oceanic internal wave on backscattering coefficient, subscene of (a) Sentinel-1A including atmospheric gravity wave on May 24, 2016 and (b) Sentinel-1B including oceanic internal wave on July 19, 2017

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 한반도 주변 연안에서의 고해상도 해상풍을 산출하고 해상풍의 정확도를 평가하기 위해 2015년 5월 1일부터 2017년 9월 30일 까지 총 395장의 Sentinel-1A/B IW 모드 수직 이중 편파 자료를 수집하여 처리하였고, C-Band VV 편파 자료 기반 GMFs인 CMOD4, CMOD\_IFR2, CMOD5, CMOD5.N, CMOD5.Na 알고리즘을 적용하여 고해상도 해상풍을 산출하였다. 해상풍을 산출하기 전 SRTM DEM 자료를 이용하여 육지 차폐 과정을 거쳤고, 적응 임계치 방법을 적용하여 선박을 탐지하여 선박 화소를 제거하고 보상하는 과정을 거쳤다. Sentinel-1A/B 자료 자체의 스펙클 잡음을 제거하기 위해 창을 설정하여 앙상블 평균을 취하는 전처리과정을 거쳤다. 해상풍의 정확도를 평가하기 위해서 실측 자료로, 기상청 해양 기상 부이 실측 자료를 사용하였다. 산란계 자료를 기반으로 개발된 GMFs는 해수면 기준 10 m 높이에서의 해상풍을 산출하기 때문에 정확한 정확도 비교를 위해서 기상청 해양 기상 부이의 실측 풍속 자료를 10 m 높이에서의 풍속으로 변환하는 과정을 거쳤고, LKB 모델에 실측 자료를 입력하여 10 m 해상풍으로 변환하였다. 검증 결과 RMSE와 편향은 각각 CMOD4 알고리즘은 1.83 m/s와 -0.64 m/s, CMOD\_IFR2 알고리즘은 1.82 m/s와 -0.59 m/s, CMOD5 알고리즘은 1.69 m/s와 -0.38 m/s, CMOD5.N 알고리즘은 1.68 m/s와 0.31 m/s, CMOD5.Na 알고리즘은 1.65 m/s와 0.14 m/s로 나타났다. 해역별로는 동해 역역과 남해 영역에서는 CMOD5.Na 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 실제 해상풍을 잘 모의하는 것으로 나타났고, 황해 영역에서는 CMOD5 알고리즘이 실제 해상풍을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 다만 황해 영역에서는 다른 해역에 비해 모든 알고리즘의 편향이 증가하는 것으로 나타났고, 이는 우리나라 황해 영역은 최대 수심이 100 m이하인 낮은 수심으로 이루어져 있어 낮은 수심에서의 해저 지형이 해수면 거칠기를 변화시켜 Sentinel-1A/B 영상 내 후방산란계수에 영향을 준 것으로 해석된다. 또한 적응 임계치 방법을 이용하여 선박을 탐지하고 보상해주

는 과정을 거쳤으나 선박의 이중 산란 및 직접 반사에 의한 강한 산란으로 발생하는 사이드로브 효과는 완벽히 제거하지 못하여 남아있는 경우, 해상풍을 과대 추정하는 잠재적 요인으로 작용한다. 이외의 기타 요인으로는 해상에 존재하는 기름과 선박 후류, 대기 중력과, 내부파 등이 있으며, 이와 같은 요인들은 해수면의 거칠기를 변화시켜 부정확한 해상풍을 산출하게 만드는 요인으로 작용한다.

Sentinel-1A/B IW 모드 수직 이중 편파 자료를 이용하여 해상풍 자료를 산출할 경우, 우리나라 주변 연안에 적합한 알고리즘은 CMOD5.Na 알고리즘으로 판단된다. 산출된 고해상도 해상풍 자료는 추후 우리나라 주변 연안 해양 현상에 대한 분석을 실시할 때 유용한 자료로 사용될 것으로 기대된다. 해상풍을 산출할 때, 수심, 선박의 제거 방법, 해상 표면에서의 기름의 존재, 선박 항적, 대기 중력과, 내부파 등 다양한 요소를 고려해야 하며, 각 요소들이 해상풍에 미치는 영향에 대한 정량적인 추가 분석과 정확한 해상풍 추정을 위해서 각 요소들을 제거하는 방법에 대한 추후 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- Beaucage, P., Glazer, A., Choisnard, J., Yu, W., Bernier, M., Benoit, R., and Lafrance, G., 2007, Wind assessment in a coastal environment using synthetic aperture radar satellite imagery and a numerical weather prediction model. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 33(5), 368-377.
- Castelao, R. M., & Barth, J. A. (2006). Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. *Geophysical Research Letters*, 33(3).
- Chen, D., Cane, M. A., and Zebiak, S. E., 1999, The impact of NSCAT winds on predicting the 1997/1998 El Niño: A case study with the Lamont-Doherty Earth Observatory model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C5), 11321-11327.
- Chen, P., Huang, W., Yang, J., Fu, B., Lou, X., and Shi, A., 2005, Comparison of ship detection algorithms in spaceborne SAR imagery. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. Proceedings. 2005 IEEE International*, 3, 1750-1752.
- Cloude, S., 2007, The dual polarization entropy/alpha decomposition: A PALSAR case study. In *Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry*, 644.
- Ebuchi, N., 1999, Statistical distribution of wind speeds and directions globally observed by NSCAT. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C5), 11393-11403.
- Ebuchi, N., Graber, H. C., and Caruso, M. J., 2002, Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(12), 2049-2062.
- Friedman, K. S., Wackerman, C., Funk, F., Rowell, K., Pichel, W. G., Clemente-Colon, P., and Li, X., 2000, Validation of an automatic vessel detection algorithm using SAR data and known vessel fleet distributions.

- In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, 5, 2071-2073.
- Friedman, K. S., Wackerman, C., Funk, F., Pichel, W. G., Clemente-Colón, P., and Li, X., 2001, Validation of a CFAR vessel detection algorithm using known vessel locations. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International*, 4, 1804-1806.
- Furevik, B. R., and Korsbakken, E., 2000, Comparison of derived wind speed from synthetic aperture radar and scatterometer during the ERS tandem phase. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2), 1113-1121.
- Gurova, E., Lehmann, A., and Ivanov, A., 2013, Upwelling dynamics in the Baltic Sea studied by a combined SAR/infrared satellite data and circulation model analysis. *Oceanologia*, 55(3), 687-707.
- Hersbach, H., Stoffelen, A., and De Haan, S., 2005, The improved C-band geophysical model function CMOD5. In *Proceedings of the 2004 Envisat and ERS Symposium*.
- Hersbach, H., Stoffelen, A., and de Haan, S., 2007, An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C3).
- Hersbach, H., 2010, Comparison of C-band scatterometer CMOD5. N equivalent neutral winds with ECMWF. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(4), 721-736.
- Horstmann, J., Koch, W., Lehner, S., and Tonboe, R., 2002, Ocean winds from RADARSAT-1 ScanSAR. *Canadian journal of remote sensing*, 28(3), 524-533.
- Johannessen, J. A., Shuchman, R. A., Digranes, G., Lyzenga, D. R., Wackerman, C., Johannessen, O. M., and Vachon, P. W., 1996, Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS 1 synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C3), 6651-6667.

- Johannessen, O. M., Johannessen, J. A., Jenkins, A. D., Davidson, K., Lyzenga, D. R., Shuchman, R., Samuel, P., Espedal, H. A., Knulst, J., Dano, E., and Reistad, M., 1996, COAST WATCH-95: ERS-1/2 SAR applications of mesoscale upper ocean and atmospheric boundary layer processes off the coast of Norway. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS'96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future.'*, *International. IEEE*, 1158-1161.
- Jones, W. L., Cardone, V. J., Pierson, W. J., Zec, J., Rice, L. P., Cox, A., and Sylvester, W. B., 1999, NSCAT high-resolution surface wind measurements in Typhoon Violet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C5), 11247-11259.
- Kang, M. K., Lee, H., Lee, M., Park, Y. W., and Yoon, W. J., 2007, The extraction of ocean wind, wave, and current parameters using SAR imagery. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International*, 507-510.
- Kim, D. J., and Moon, W. M., 2002, Estimation of sea surface wind vector using RADARSAT data. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 55-64.
- Kim, D. J., Moon, W. M., and Nam, S., 2003, Evaluation of ENVISAT ASAR data for measurement of surface wind field over the Korean east coast. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International*, 4, 2712-2714.
- Kim, D. J., Moon, W. M., and Kim, Y. S., 2010, Application of TerraSAR-X data for emergent oil-spill monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2), 852-863.
- Kim, T. S., Park, K., and Moon, W. I., 2010, Wind vector retrieval from SIR-C SAR data off the east coast of Korea. *Journal of the Korean earth science society*, 31(5), 475-487.
- Kim, T. S., Park, K., Choi, W. M., Hong, S., Choi, B. C., Shin, I., and Kim, K. R., 2012, L-band SAR-derived sea surface wind retrieval off

- the east coast of Korea and error characteristics. *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(5), 477-487.
- Kim, H. G., Hwang, H. J., Lee, S. H., and Lee, H. W., 2014, Evaluation of SAR wind retrieval algorithms in offshore areas of the Korean Peninsula. *Renewable Energy*, 65, 161-168.
- Kim, T. S., Park, K. A., Li, X., and Hong, S., 2014, SAR-derived wind fields at the coastal region in the East/Japan Sea and relation to coastal upwelling. *International journal of remote sensing*, 35(11-12), 3947-3965.
- Kim, T. S., Park, K. A., Li, X., Mouche, A. A., Chapron, B., and Lee, M., 2017, Observation of Wind Direction Change on the Sea Surface Temperature Front Using High-Resolution Full Polarimetric SAR Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- Koch, W., 2004, Directional analysis of SAR images aiming at wind direction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(4), 702-710.
- Komarov, A. S., Zabeline, V., and Barber, D. G., 2014, Ocean surface wind speed retrieval from C-band SAR images without wind direction input. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(2), 980-990.
- Komarov, S., Komarov, A., and Zabeline, V., 2012, Marine wind speed retrieval from RADARSAT-2 dual-polarization imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37(5), 520-528.
- Korsbakken, E., Johannessen, J. A., and Johannessen, O. M., 1998, Coastal wind field retrievals from ERS synthetic aperture radar images. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C4), 7857-7874.
- Lehner, S., Horstmann, J., Koch, W., and Rosenthal, W., 1998, Mesoscale wind measurements using recalibrated ERS SAR images. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C4), 7847-7856.
- Li, X., Pichel, W. G., He, M., Wu, S. Y., Friedman, K. S.,



- Clemente-Colón, P., and Zhao, C., 2002, Observation of hurricane-generated ocean swell refraction at the Gulf Stream north wall with the RADARSAT-1 synthetic aperture radar. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 40(10), 2131-2142.
- Li, X., Dong, C., Clemente-Colón, P., Pichel, W. G., and Friedman, K. S., 2004, Synthetic aperture radar observation of the sea surface imprints of upstream atmospheric solitons generated by flow impeded by an island. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C2).
- Li, X., Zheng, W., Pichel, W. G., Zou, C. Z., and Clemente-Colón, P., 2007, Coastal katabatic winds imaged by SAR. *Geophysical research letters*, 34(3).
- Li, X., Li, X., and He, M., 2009, Coastal upwelling observed by multi-satellite sensors. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(7), 1030-1038.
- Li, X., Zheng, W., Yang, X., Li, Z., and Pichel, W. G., 2011, Sea surface imprints of coastal mountain lee waves imaged by synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C2).
- Li, X., Zhang, J. A., Yang, X., Pichel, W. G., DeMaria, M., Long, D., and Li, Z., 2013, Tropical cyclone morphology from spaceborne synthetic aperture radar. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(2), 215-230.
- Lin, H., Xu, Q., and Zheng, Q., 2008, An overview on SAR measurements of sea surface wind. *Progress in Natural Science*, 18(8), 913-919.
- Liu, K. S., and Chan, J. C., 1999, Size of tropical cyclones as inferred from ERS-1 and ERS-2 data. *Monthly Weather Review*, 127(12), 2992-3001.
- Liu, W. T., Katsaros, K. B., and Businger, J. A., 1979, Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface. *Journal of the Atmospheric*

- Sciences*, 36(9), 1722-1735.
- Liu, W. T., and Tang, W., 1996, Equivalent neutral wind. *JPL Publication 96-17*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, USA.
- Liu, W. T., Tang, W., and Polito, P. S., 1998, NASA scatterometer provides global ocean-surface wind fields with more structures than numerical weather prediction. *Geophysical Research Letters*, 25(6), 761-764.
- Martín-de-Nicolás, J., Jarabo-Amores, P., del-Rey-Maestre, N., Gómez-del-Hoyo, P., and Bárcena-Humanes, J. L., 2015, Robustness of a generalized gamma CFAR ship detector applied to TerraSAR-X and Sentinel-1 images. In *EUROCON 2015-International Conference on Computer as a Tool (EUROCON)*, 1-6.
- Moon, W. M., Staples, G., Kim, D. J., Park, S. E., and Park, K. A., 2010, RADARSAT-2 and coastal applications: Surface wind, waterline, and intertidal flat roughness. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 800-815.
- Nunziata, F., Gambardella, A., and Migliaccio, M., 2013, On the degree of polarization for SAR sea oil slick observation. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 78, 41-49.
- Park, K. A., and Cornillon, P. C., 2002, Stability-induced modification of sea surface winds over Gulf Stream rings. *Geophysical research letters*, 29(24).
- Park, K. A., Cornillon, P. C., and Codiga, D. L., 2006, Modification of surface winds near ocean fronts: Effects of Gulf Stream rings on scatterometer (QuikSCAT, NSCAT) wind observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C3).
- Quilfen, Y., Chapron, B., Elfouhaily, T., Katsaros, K., and Tournadre, J. 1998, Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C4), 7767-7786.
- Risien, C. M., and Chelton, D. B., 2008, A global climatology of surface wind and wind stress fields from eight years of QuikSCAT

- scatterometer data. *Journal of Physical Oceanography*, 38(11), 2379-2413.
- Sato, O. T., Polito, P. S., and Timothy Liu, W. (2002). Intra-decadal variability in the Ekman heat flux from scatterometer winds. *Geophysical research letters*, 29(17).
- Singha, S., Ressel, R., Velotto, D., and Lehner, S., 2016, A combination of traditional and polarimetric features for oil spill detection using TerraSAR-X. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(11), 4979-4990.
- Stoffelen, A., and Anderson, D., 1997, Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C3), 5767-5780.
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., and Rostan, F., 2012, GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9-24.
- Vachon, P. W., and Dobson, F. W., 2000, Wind retrieval from RADARSAT SAR images: Selection of a suitable C-band HH polarization wind retrieval model. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(4), 306-313.
- Velotto, D., Bentes, C., Tings, B., and Lehner, S., 2016, First comparison of Sentinel-1 and TerraSAR-X data in the framework of maritime targets detection: South Italy case. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 41(4), 993-1006.
- Velotto, D., Lehner, S., Soloviev, A., and Maingot, C., 2012, Analysis of oceanic features from dual-polarization high resolution X-band SAR imagery for oil spill detection purposes. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, 2841-2844.
- Velotto, D., Bentes, C., Tings, B., and Lehner, S., 2016, First comparison of

- Sentinel-1 and TerraSAR-X data in the framework of maritime targets detection: South Italy case. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 41(4), 993-1006.
- Verspeek, J., Stoffelen, A., Verhoef, A., and Portabella, M., 2012, Improved ASCAT wind retrieval using NWP ocean calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(7), 2488-2494.
- Xie, L., Zhang, H., Wang, C., Wu, F., Zhang, B., and Tang, Y., 2013, Maritime application using Ha decomposition in compact and dual-pol SAR. In *Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2013 Asia-Pacific Conference*, 563-566.
- Xu, Q., Lin, H., Li, X., Zuo, J., Zheng, Q., Pichel, W. G., and Liu, Y., 2010, Assessment of an analytical model for sea surface wind speed retrieval from spaceborne SAR. *International Journal of Remote Sensing*, 31(4), 993-1008.
- Yang, X., Li, X., Zheng, Q., Gu, X., Pichel, W. G., and Li, Z., 2011, Comparison of ocean-surface winds retrieved from QuikSCAT scatterometer and Radarsat-1 SAR in offshore waters of the US west coast. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(1), 163-167.
- Zhang, B., Perrie, W., Vachon, P. W., Li, X., Pichel, W. G., Guo, J., and He, Y., 2012, Ocean vector winds retrieval from C-band fully polarimetric SAR measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(11), 4252-4261.
- Zhang, Y., Li, Y., and Lin, H., 2014, Oil-spill pollution remote sensing by synthetic aperture radar. In *Advanced Geoscience Remote Sensing*.
- Zhang, B., Li, X., Perrie, W., and He, Y., 2015, Synergistic measurements of ocean winds and waves from SAR. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(9), 6164-6184.

## **Abstract**

# **Retrieval of Sea Surface Wind from Sentinel-1A/B SAR Data in the Seas around Korea**

Jae-Cheol Jang

Science Education (Earth Science)

The Graduate School

Seoul National University

Sea surface wind is one of the key components in the study of waves, currents, ocean circulation, and atmospheric-ocean interactions, providing us with a overall understanding of complex marine phenomena. As interest in climate change has increased, the importance of observing the global wind field has been emphasized and European Space Agency (ESA) and National Aeronautics and Space Administration (NASA) have been producing global wind fields data using scatterometer. These scatterometer data are accurate to  $\pm 2$  m/s, but they have disadvantages that are deficiency of coastal wind field data and impossibility of analysis of small scale marine phenomena due to low spatial resolution. Synthetic Aperture Radar (SAR) with active microwave sensor has low effects due to atmospheric and meteorological

conditions and has high spatial resolution of several tens of meters, enabling to retrieve high resolution wind field data of less than 1 km. Therefore, although the SAR data has the advantage of retrieving the coastal wind field and analyzing the marine phenomenon on a small scale, there is insufficient to previous SAR data. Sentinel-1A/B satellites equipped with C-band (5.405 GHz) SAR using Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR), unlike previous SAR-equipped satellites, is advantageous to SAR data acquisition and wide swath width, so widely used in various fields. In this study, 395 Sentinel-1A/B Interferometric Wide swath mode vertical dual polarization data were collected and processed from May 1, 2015 to September 30, 2017. After land masking was performed using Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Model (DEM) data, in order to eliminate the influence of the double scattering of ship on wind field, ship removal process was performed using adaptive threshold method, and to remove speckle noise in Sentinel-1A/B data itself, we performed a preprocessing that set up a moving window and apply an ensemble average.. Pre-processed Sentinel-1A/B data are applied to CMOD4, CMOD\_IFR2, CMOD5, CMOD5.N, and CMOD5.Na algorithms developed on the basis of C-Band VV polarization scatterometer data to calculate the sea surface wind at the Korean coastal region and the estimated sea surface wind from Sentinel-1A/B are assessed the accuracy by in-situ measurements of Korean Meteorological Administration (KMA) ocean meteorological buoy. The Root Mean Square Error (RMSE) of CMOD4 was 1.83 m/s, CMOD\_IFR2 was 1.82 m/s, CMOD5 was 1.69 m/s, CMOD5.N was 1.68 m/s, and CMOD5.Na was 1.65 m/s, and CMOD5.Na algorithm make the best estimate the sea surface wind in the seas around Korean Peninsula. In the Yellow Sea, the bias is larger than other regions, which suggests that the submarine topography in the lower depth region have effected changes of the sea surface roughness in the SAR image and it was a cause of error factor in

the sea surface wind. Through this study, it is expected that high resolution offshore wind field data in the coastal region of the Korean Peninsula retrieved from Sentinel-1A/B data will help to understand the coastal marine phenomenon.

keywords : Sea surface wind, Sentinel-1A/B, Adaptive threshold method,  
GMFs for C-Band SAR

Student Number : 2016-21608