

## Review

# 인공위성 합성개구레이더 영상 자료의 해양 활용 - 해상풍 산출을 중심으로 -

장재철<sup>1</sup> · 박경애<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 과학교육과, 08826, 서울특별시 관악구 관악로 1

<sup>2</sup>서울대학교 지구과학교육과/해양연구소, 08826, 서울특별시 관악구 관악로 1

## Oceanic Application of Satellite Synthetic Aperture Radar - Focused on Sea Surface Wind Retrieval -

Jae-Cheol Jang<sup>1</sup> and Kyung-Ae Park<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Science Education, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>2</sup>Department of Earth Science Education/Research Institute of Oceanography,  
Seoul National University, Seoul 08826, Korea

**Abstract:** Sea surface wind is a fundamental element for understanding the oceanic phenomena and for analyzing changes of the Earth environment caused by global warming. Global research institutes have developed and operated scatterometers to accurately and continuously observe the sea surface wind, with the accuracy of approximately  $\pm 20^\circ$  for wind direction and  $\pm 2 \text{ m s}^{-1}$  for wind speed. Given that the spatial resolution of the scatterometer is 12.5–25.0 km, the applicability of the data to the coastal area is limited due to complicated coastal lines and many islands around the Korean Peninsula. In contrast, Synthetic Aperture Radar (SAR), one of microwave sensors, is an all-weather instrument, which enables us to retrieve sea surface wind with high resolution ( $< 1 \text{ km}$ ) and compensate the sparse resolution of the scatterometer. In this study, we investigated the Geophysical Model Functions (GMF), which are the algorithms for retrieval of sea surface wind speed from the SAR data depending on each band such as C-, L-, or X-band radar. We reviewed in the simulation of the backscattering coefficients for relative wind direction, incidence angle, and wind speed by applying LMOD, CMOD, and XMOD model functions, and analyzed the characteristics of each GMF. We investigated previous studies about the validation of wind speed from the SAR data using these GMFs. The accuracy of sea surface wind from SAR data changed with respect to observation mode, GMF type, reference data for validation, preprocessing method, and the method for calculation of relative wind direction. It is expected that this study contributes to the potential users of SAR images who retrieve wind speeds from SAR data at the coastal region around the Korean Peninsula.

**Keywords:** Sea Surface Wind, Synthetic Aperture Radar (SAR), L-band Model (LMOD), C-band Model (CMOD), X-band Model (XMOD)

---

\*Corresponding author: kapark@snu.ac.kr  
Tel: +82-2-880-7780

**요약:** 해상공은 해양 현상을 이해하고, 지구 온난화에 의한 지구 환경의 변화를 분석하기 위한 필수 요소이다. 전세계 연구 기관은 해상공을 정확하고 지속적으로 관측하기 위해 산란계(scatterometer)를 개발하여 운영하고 있으며, 정확도는 풍향이  $\pm 20^\circ$ , 풍속이  $\pm 2 \text{ m s}^{-1}$  안팎이다. 하지만, 산란계의 해상도는 12.5-25.0 km로, 해안선이 복잡하고 섬이 많은 한반도 근해에서는 자료의 결측이 빈번하게 발생하여 활용도가 감소한다. 그에 반해, Synthetic Aperture Radar (SAR, 합성개구레이더)는 마이크로파를 활용하는 전천후 센서로, 1 km 이하의 고해상도 해상공이 산출이 가능하여 산란계의 단점 보완이 가능하다. 본 연구에서는 일반적으로 활용되는 SAR 자료 기반 해상공 산출 알고리즘인 Geophysical Model Function (GMF, 지구 물리 모델 함수)를 밴드별로 분류하여 조사하였다. 상대 풍향, 입사각, 풍속에 따른 후방산란계수를 L-band Model (LMOD, L 밴드 모델), C-band Model (CMOD, C 밴드 모델), X-band Model (XMOD, X 밴드 모델)에 적용하여 모의하였고, 각 GMF의 특성을 분석하였다. 이러한 GMF를 SAR 탑재 인공위성 자료에 적용하여 산출한 해상공의 정확도 검증 연구에 대해 조사하였다. SAR 자료 기반 해상공의 정확도는 영상 관측 모드, 적용한 GMF의 종류, 정확도 비교 기준 자료, SAR 자료 전처리 방법, 상대 풍향 정보 산출 방법 등에 따라 변하는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 국내 연구자들의 SAR 자료 기반 해상공 산출 방법에 대한 접근성이 향상되고, 고해상도 해상공 자료를 활용한 한반도 근해 분석에 이바지할 것으로 기대된다.

**주요어:** 해상공, Synthetic Aperture Radar (SAR, 합성개구레이더), L-band Model (LMOD, L 밴드 모델), C-band Model (CMOD, C 밴드 모델), X-band Model (XMOD, X 밴드 모델)

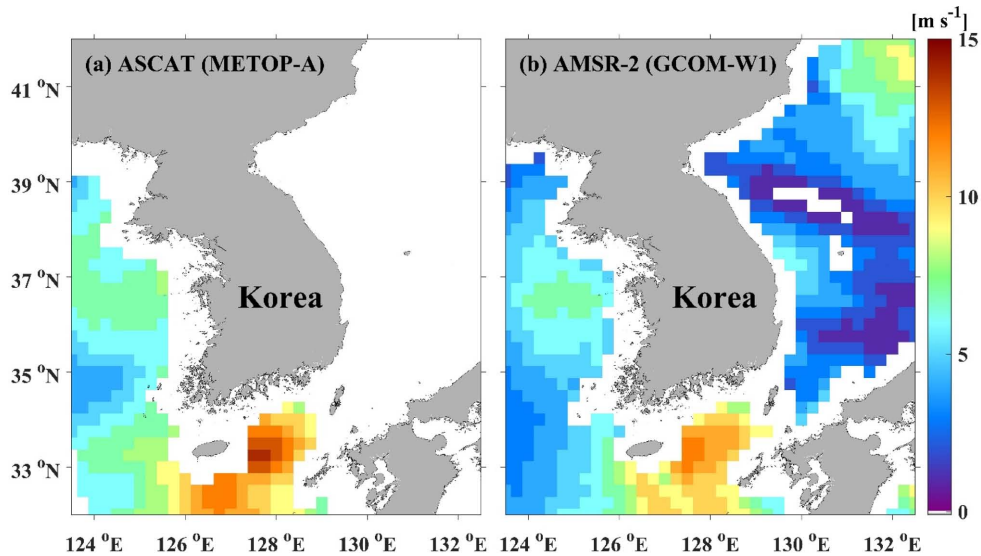
## 서론

해상공은 대기-해양 경계층(marine atmospheric boundary layer)에서의 상호 작용을 이해하고 예측하기 위한 가장 기초적인 변수로(Cornillon and Park, 2001), 지구 온난화를 포함한 기후 변화가 가속화되면서 그 관측의 중요성이 강조되고 있다(Graf et al., 1998). 또한 해상공은 기후 변화에 의한 해양의 변화뿐만 아니라 해빙의 변화와 같은 지구 시스템과 상호 연관되어 있다는 것이 기존의 연구들을 통해 규명되었다(Katsaros and Brown, 1991; Yuan et al., 1999; Merrifield and Maltrud, 2011; Spreen et al., 2011). 이에 따라 전세계 연구자들은 1990년대부터 전세계 해상공 관측을 위해 능동(active) 마이크로파 센서 탑재 인공위성인 산란계(scatterometer, SCAT)를 개발하여 운영하고 있다. 산란계는 공간 해상도가 12.5-25.0 km인 바람장 자료를 생산하고, 그 자료의 정확도는 풍향이  $\pm 20^\circ$ , 풍속이  $\pm 2 \text{ m s}^{-1}$  안팎이다(Ebuchi, 1999). 전세계 연구 기관은 산란계 자료를 활용하여 정확한 해상공을 전세계 해역에 걸쳐서 연속적으로 감시하고 있고(Risien and Chelton, 2008), 대기-해양 경계층에서의 상호 작용(Park et al., 2006), 태풍 감시(Liu and Chan, 1999), 대기 수치모델의 정확도 향상을 포함한 다양한 연구 분야에 활용되고 있다(Liu et al., 1998).

해상공 자료는 산란계뿐만 아니라 수동(passive) 마이크로파 센서 탑재 인공위성과 고도계(altimeter) 관

측 자료를 기반으로도 산출이 가능하다(Cipollini et al., 2010; Mai et al., 2016). 하지만, 산란계, 수동 마이크로파 센서, 고도계에서 산출되는 해상공 자료는 10.0-25.0 km의 공간 해상도로 인해 연안 해양 환경과 섬이 많은 지형에서는 활용성이 제한된다(Tang et al., 2004; Rodriguez et al., 2009). 이러한 인공위성 기반 해상공 자료의 낮은 공간 해상도는 섬이 많고, 해안선이 복잡한 한반도 해양 환경에서는 불리하게 작용하며, 다른 해양 환경에 비해 연안에서의 심각한 자료 결측의 원인이 된다(Fig. 1). 또한 정확한 육지 입력 자료의 부재로 인해 섬이 포함되는 화소에서도 생산된 해상공 자료를 포함한 오차 요인으로 인해 연안 해상공 자료의 경우, 신뢰하기 어렵다(Fig. 1). 따라서 한반도 주변 해역의 해양 환경을 감시하고 분석하기 위해서는 기존의 인공위성 기반 해상공 자료의 낮은 공간 해상도라는 단점을 보완하면서  $2 \text{ m s}^{-1}$ 의 풍속 정확도를 보장하는 고해상도 해상공 자료 산출이 필요하다.

Synthetic Aperture Radar (SAR, 합성개구레이더)는 능동 마이크로파 센서로, 기존의 능동 마이크로파 센서와 차별화된 관측 방법을 활용하여 마이크로파의 낮은 공간 해상도 단점을 보완하였고, 1 km 이내의 고해상도 자료 생산이 가능하다(Moreira et al., 2013). 또한 마이크로파를 활용하기 때문에 대기 환경의 영향을 거의 받지 않는 전천후 센서로 활용되고 있다. 타 인공위성 센서에 비해 높은 공간 해상도 관측이 가능한 장점을 보유하고 있고, SAR 자료 분석 기술



**Fig. 1.** Distributions of sea surface wind speed from (a) ASCAT carried on METOP-A and (b) AMSR-2 carried on GCOM-W1 observed on May 1, 2019.

개발에 따라 전세계적으로 SAR 탑재 인공위성을 적극적으로 개발하여 운용하고 있다. 초기에는 육지 관측에 중점을 두고 운용되었으나, SAR 자료 분석 기술 개발로 인해 최근에는 선박 탐지(Park et al., 2018), 기름 탐지(Kim et al., 2015), 고해상도 바람장 감시(Jang et al., 2018), 태풍 감시(Li et al., 2013), 대기-해양 경계층에서의 상호 작용(Kim et al., 2017) 등을 포함한 해양 분야에도 적극적으로 활용되고 있다.

SAR 자료는 기존의 인공위성 기반 해상풍 자료가 갖고 있는 낮은 공간 해상도라는 단점은 보완하면서  $2 \text{ m s}^{-1}$ 의 풍속 정확도를 갖는 100 m 이하의 고해상도 해상풍 자료 산출이 가능하기 때문에 우리나라 해양 환경에서의 활용 가능성이 크다. 하지만, 그에 반해 SAR 자료를 활용한 해상풍 산출 연구는 SAR의 다른 연구 분야에 비해 미비한 실정이고, 특히 기존의 국내 연구에서는 해양 환경 분석을 위해서 타 인공위성 기반 해상풍 자료를 주로 활용하고 있다. 이러한 해상풍 연구 방법의 추세는 SAR 자료 기반 해상풍 산출에 관한 국내 연구자들의 해상풍 산출 방법에 대한 접근성이 낮기 때문인 것으로 사료되며, 고해상도 해상풍 자료의 적극적인 활용 연구를 위해서는 SAR 자료 기반 해상풍 산출 방법에 대한 개괄적인 정리가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이를 위해 1) SAR 탑재 인공위성의 개요를 정리하고, 2)

SAR 자료를 활용한 해상풍 산출 방법에 대해 개괄적으로 설명하고, 3) 일반적으로 활용되는 해상풍 산출 알고리즘을 모의하고, 4) 기존 해상풍 정확도 분석 연구를 인공위성과 해상풍 산출 알고리즘에 따라 개괄적으로 요약하여 제시하고자 한다.

## SAR 탑재 인공위성

### SAR 센서

레이더는 마이크로파 영역의 신호를 능동적으로 송신하여 물체에서 반사되어 되돌아오는 신호를 수신하고 신호의 세기를 분석하여 물체를 분석하는 센서이다. 이러한 레이더는 지상의 특정 영역에 전자기 신호를 송신하고, 그로부터 되돌아오는 신호를 수신하게 되며, 신호의 세기와 되돌아오는 데 소요된 시간을 기록한다(Skolnik, 1980). 초기 레이더는 항공기에 부착하여 군사 용도로 사용되는 Real Aperture Radar (RAR, 실개구레이더)을 중심으로 개발되었다(James, 1989). 일반적으로 쓰인 RAR은 항공기의 비행 방향과 수직인 방향으로 일정한 시간 간격에 따라 마이크로파 신호를 송신하게 되고, 지표 위의 물체 또는 지표면 환경에 따라 산란된 신호 중 후방산란된 성분을 수신하여 지표를 관측한다(Oliver, 1989). 이렇게 탑재체의 이동 방향과 수직인 방향을 관측하는 RAR을 Side Looking Airborne Radar(SLAR)이라 한

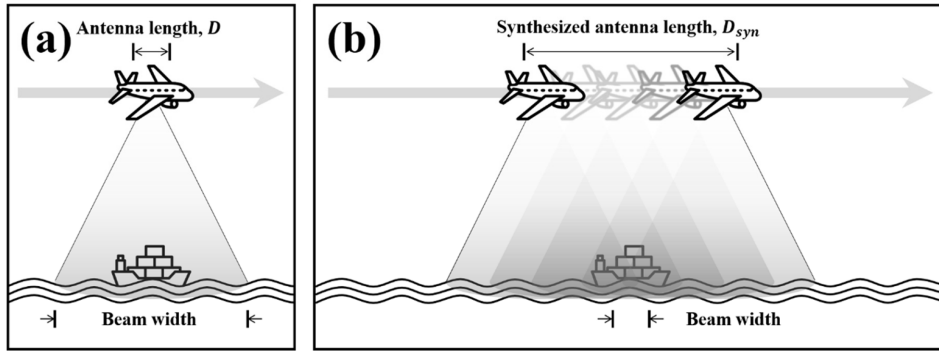


Fig. 2. Schematic diagram of observing the ocean from (a) RAR and (b) SAR.

다. RAR의 거리(range) 방향 분해능(m)과 방위각(azimuth) 방향 분해능(m)은 다음과 같다:

$$r_R = \frac{C}{2B \sin(\theta_r)} \quad (1)$$

$$r_a = \frac{\lambda R}{D} \quad (2)$$

$c$ 는 빛의 속도( $\text{m s}^{-1}$ ),  $B$ 는 대역폭(Hz),  $\theta$ 는 레이더와 지표면과의 입사각,  $\lambda$ 는 파장(m),  $R$ 은 목표물까지의 거리(m),  $L$ 은 안테나의 직경(m)을 가리킨다. 거리 방향 해상도는 레이더 탑재 기기의 이동 방향의  $90^\circ$  방향, 즉 레이더의 관측 방향과 평행한 방향으로의 해상도를 의미하며, 짧은 펄스(pulse)를 사용할수록 시간 해상도가 작아지고, 그에 따라 스펙트럼이 넓어지면서 해상도가 작아지지만, 시간 해상도가 작아지면 평균 에너지 총량이 감소하여 자료의 정교함이 감소하게 된다. 따라서 레이더 시스템에서는 거리 방향 해상도와 신호의 세기를 균형적으로 유지하기 위해 일반적으로 선형적 주파수 변조 신호인 칩(chirp) 신호를 사용한다. 칩 신호를 사용하게 되면 좁은 신호를 송신하지 않아도 인접한 목표물 사이에서 후방산란되어 되돌아오는 신호를 거리 방향 압축(range compression)을 통해 판별하는 것이 가능하다(Oliver and Quegan, 2004). 항공기에 탑재하여 관측하는 경우 자료의 거리 방향 해상도와 레이더 탑재 기기의 이동 방향과 평행한 방향으로의 해상도를 의미하는 방위각 방향 해상도가 지표 식별하기에 적합한 수준에 이르지만, 이를 인공위성에서 활용하는 경우 목표물까지의 거리가 급격히 증가하고 탑재 가능한 안테나의 크기가 제한되기 때문에 방위각 방향 해상도가 지상 목표물 탐지에 적합한 수준에 도달하기 어렵다.

SAR는 RAR이 인공위성에 탑재되는 경우 방위각 방향 해상도가 급격히 저하되는 한계점을 보완한 레이더이다. RAR 시스템은 하나의 안테나가 동일한 지점을 한 번 관측하지만, SAR 시스템은 탑재체가 진행함에 따라 하나의 안테나가 동일한 지점을 여러 번 관측한다(Fig. 2). 하나의 안테나가 동일한 지점을 탑재체가 진행함에 따라 여러 번 관측하게 되면 목표물과의 거리 증감에 따른 도플러 편이(Doppler shift)로 인해 관측 주파수가 변화하게 되고, 이는 마치 첩 신호를 사용하는 것과 같은 효과를 발생시키게 된다(Chan and Koo, 2008). 이러한 효과로 인해 SAR 영상 분석시 신호를 방위각 방향 압축(azimuth compression)을 통해 방위각 방향 해상도 또한 향상시키는 것이 가능하고 SAR 시스템에서의 방위각 방향 분해능은 다음과 같다:

$$r_a = \frac{D}{2} \quad (3)$$

$D$ 는 SAR 시스템의 안테나 직경(m)을 나타낸다. 물리적으로 작은 안테나를 활용하여 같은 지점을 여러 번 관측하는 원리를 기반으로 각 위치에서의 관측 신호를 이론적으로 합성하면 가상의 큰 안테나로 측정한 것과 같은 고해상도 레이더 영상 자료 획득이 가능하다(Oliver and Quegan, 2004).

SAR는 전자기파를 사용하는 능동 센서이기 때문에 편파(polarization)에 따라 관측 가능한 정보가 달라진다. 가장 기본적인 편파는 전자기파의 이동 방향에 대해 수직방향으로 진동하는 수직 편파와 수평방향으로 진동하는 수평 편파로, 이로 인해 송신 신호와 수신 신호에 따라 HH 편파(수평송신-수평수신), HV 편파(수평송신-수직수신), VH 편파(수직송신-수

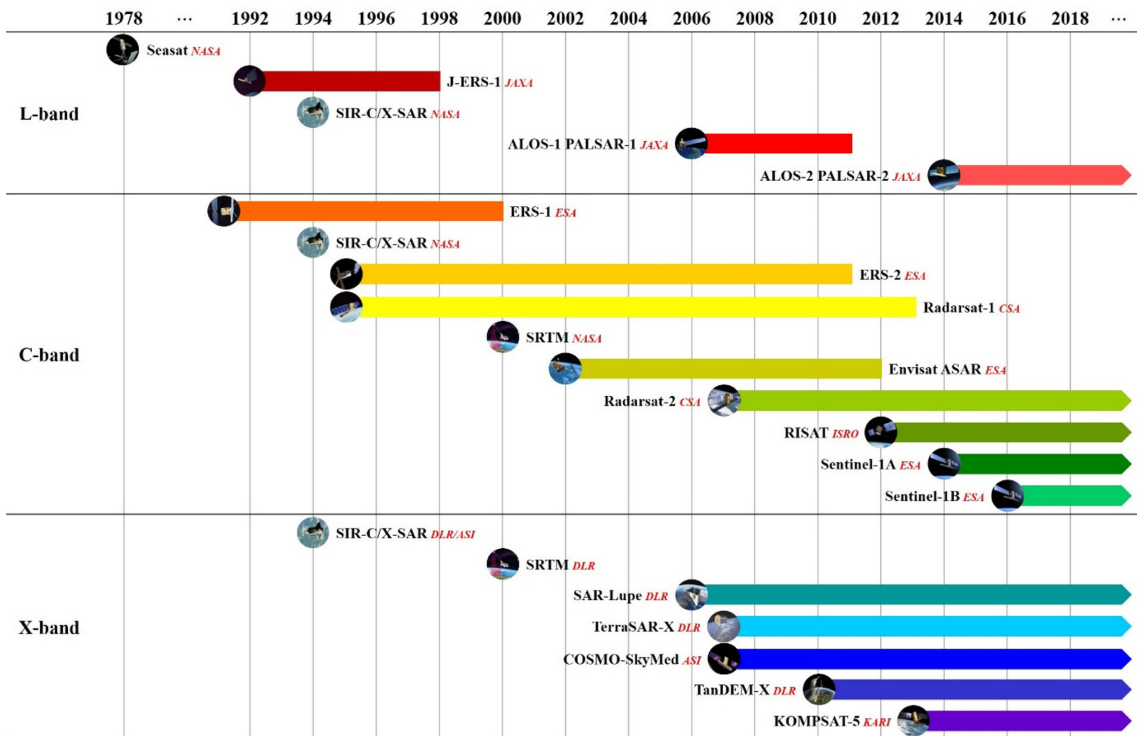


Fig. 3. Status of the satellites equipped with SAR instrument from 1978 to present.

평수신), VV 편파(수직송신-수직수신)로 분류가 가능하다(Massonnet and Souyris, 2008). SAR 자료 활용 분야에 따라 일반적으로 활용하는 편파 정보가 달라지고, 해상풍 산출 분야에서는 일반적으로 VV 편파를 사용하며, 밴드에 따라 HH 편파를 사용하는 경우도 있다. SAR 영상을 분석하는 경우, HH나 VV처럼 단일 편파를 사용하는 경우가 일반적이었지만, 최근에는 HV나 VH 편파 자료를 같이 활용하는 이중 편파 분석 방법이 개발되고 있는 추세이다(Xu et al. 2016; Mouche et al., 2017; Johansson et al., 2018).

### SAR 탑재 인공위성의 연혁

Fig. 3은 센서별 시기에 따른 SAR 탑재 인공위성의 운용 기간 및 운용 기관을 정리한 것이다. 최초로 SAR를 탑재하여 운용된 인공위성은 Seasat으로 미국 NASA (National Aeronautics and Space Administration, 미국항공우주국)에서 개발하였고, 1978년 6월 28일에 발사되어 약 3개월간 운용되었다. Seasat은 L 밴드 SAR를 탑재한 인공위성으로 HH 단일 편파 모드로 관측하였다. ESA (European Space Agency, 유럽항공우주국)에서는 1991년 유럽 최초의 SAR 탑재 인공

위성인 ERS-1 (European Remote Sensing-1)을 개발하여 2000년까지 운용하였고, C 밴드 SAR를 활용하여 VV 단일 편파 모드로 관측하였다. JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency, 일본항공우주국)에서는 1992년 일본 최초의 SAR 탑재 인공위성인 J-ERS-1 (Japan Earth Resources Satellite-1)을 개발하여 1998년까지 운용하였고, L 밴드 SAR를 활용하여 HH 단일 편파 모드로 관측하였다. 1994년 4월과 10월에는 L 밴드, C 밴드, X 밴드 SAR를 모두 탑재한 인공위성인 SIR-C/X-SAR (Spaceborne Imaging Radar-C/X-band Synthetic Aperture Radar)가 NASA, DLR (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, 독일항공우주국), ASI (Agenzia Spaziale Italiana, 이탈리아항공우주국)에 의해 개발되어 운용되었고, L 밴드와 C 밴드 SAR는 사중 편파 모드(HH+HV+VH+VV)로 관측하였고, X 밴드 SAR는 VV 편파 모드로 관측하였다. CSA (Canadian Space Agency, 캐나다항공우주국)에서는 1995년 캐나다 최초의 SAR 탑재 인공위성인 Radarsat-1을 개발하여 2013년까지 운용하였고, C 밴드 SAR를 활용하여 HH 단일 편파 모드로 관측하였다. ESA에서 개발한 C 밴드 SAR 탑재 인

공위성인 ERS-2는 1995년부터 2011년까지 운용되었고, VV 단일 편파 모드로 관측하였다. 2000년 2월 NASA에서는 C 밴드와 X 밴드 SAR를 모두 탑재한 인공위성인 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)을 운용하였고, C 밴드 SAR는 HH+VV 이중 편파 모드로 관측하였고, X 밴드 SAR는 VV 편파 모드로 관측하였다. C 밴드 SAR 탑재 인공위성인 Envisat ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar)는 ESA에서 2002년부터 2012년까지 운용하였고, 5가지의 편파 모드(HH, VV, HH+HV, HH+VV, VV+VH)로 관측하였다. L 밴드 SAR 탑재 인공위성인 ALOS-1 PALSAR-1 (Advanced Land Observing Satellite-1 Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar-1)은 JAXA에서 2006년부터 2011년까지 운용하였고, 5가지의 편파 모드(HH, VV, HH+HV, VV+VH, HH+HV+VH+VV)로 관측하였다. DLR에서는 X 밴드 SAR 탑재 인공위성인 TerraSAR-X를 2007년부터, TanDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement)를 2010년부터 운용하고 있으며, 5가지의 편파 모드(HH, VV, HH+HV, HH+VV, VV+VH)로 관측하고 있다. CSA에서 2007년부터 운용하고 있는 Radarsat-2는 C 밴드 SAR를 탑재하여 7가지의 편파 모드(HH, HV, VH, VV, HH+HV, VV+VH, HH+HV+VH+VV)로 관측하고 있다. COSMO-SkyMed (Constellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation)는 ASI에서 2007년 6월부터 2010년 11월까지 4개의 연속된 X 밴드 SAR 탑재 시리즈 인공위성을 개발하여 운용하고 있고, 7가지의 편파 모드(HH, HV, VH, VV, HH+HV, HH+VV, VV+VH)로 관측하고 있다. C 밴드 SAR 탑재 인공위성인 RISAT (Radar Imaging Satellite)은 ISRO (Indian Space Research Organisation, 인도우주 연구기구)에서 2012년에 개발되어 운용되고 있으며, 7가지의 편파 모드(HH, HV, VH, VV, HH+HV, VV+VH, HH+HV+VH+VV)로 관측하고 있다. KARI (Korea Aerospace Research Institute, 한국항공우주연구원)에서는 최초의 대한민국 SAR 탑재 인공위성인 KOMPSAT-5 (Korean Multi-purpose Satellite-5)를 2013년에 개발하여 운용하고 있으며, X 밴드 SAR를 활용하여 4가지의 편파 모드(HH, HV, VH, VV)로 관측하고 있다. JAXA에서는 2014년부터 L 밴드 SAR 탑재 인공위성인 ALOS-2 PALSAR-2를 개발하여 운용하고 있으며, 7가지의 편파 모드(HH, HV,

VH, VV, HH+HV, VV+VH, HH+HV+VH+VV)로 관측하고 있다. ESA에서는 C 밴드 SAR 탑재 인공위성인 Sentinel-1A는 2014년부터, Sentinel-1B는 2016년부터 운용하고 있으며, 4가지의 편파 모드(HH, VV, HH+HV, VV+VH)로 관측하고 있다.

## 해상풍 산출 알고리즘

Fig. 4는 SAR 자료를 활용하여 해상풍을 산출하기 위한 개괄적인 순서도이다. 먼저 SAR Level 1 자료로부터 후방산란계수(normalized radar cross section, NRCS), 입사각, 레이더 방위각(azimuth look angle)을 계산한다. 풍향 자료와 레이더 방위각을 기반으로 상대 풍향 정보를 계산하고, 이를 Geophysical Model Function (GMF, 지구 물리 모델 함수)에 입력하여 해수면 기준 10-m 높이에서의 해상풍을 계산한다. 풍향 정보를 산출하는 방법은 외부 입력 자료를 활용하는 방법(Monaldo et al., 2001; Yang et al., 2011), SAR 자료 영상 분석 방법(Lehner et al., 1998; Vachon and Dobson, 2000; Koch, 2004), 사중 편파 방법(Zhang et al., 2012; Zhang et al., 2015)이 있다. 대부분의 SAR 자료는 단일 편파 또는 이중 편파 모드로 관측하기에 사중 편파 방법을 사용하기는 현실적으로 어렵다. 또한 SAR 자료 영상 분석을 위해서는 일정 방향으로 바람이 지속적으로 불어 해수면의 거칠기를 규칙적으로 변화시키고 그로 인해 SAR 영상에 바람 흔적(wind streak)이 형성되어야 한다. 하지만, 바람 흔적이 형성되는 경우는 극히 일부이기에 SAR 자료를 활용한 해상풍 산출의 풍향 입력 방법 중 가장 일반적으로 사용되는 방법은 외부 입력 자료를 활용하는 방법이다. 사용 가능한 외부 입력 자료로는 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)나 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction and the National Center for Atmospheric Research)과 같은 대기 수치 모델 자료와 SAR 관측 시간과 비슷한 시간에 관측된 산란계 관측 자료, 해양 부이 실측 자료가 있다.

### L-band GMFs

L-band (1215-1400 MHz) SAR 자료를 활용한 국제적 해양 연구 동향은 해빙 연구(Wakabayashi et al., 2004; Rignot, 2008; Meyer et al., 2011; Tamura

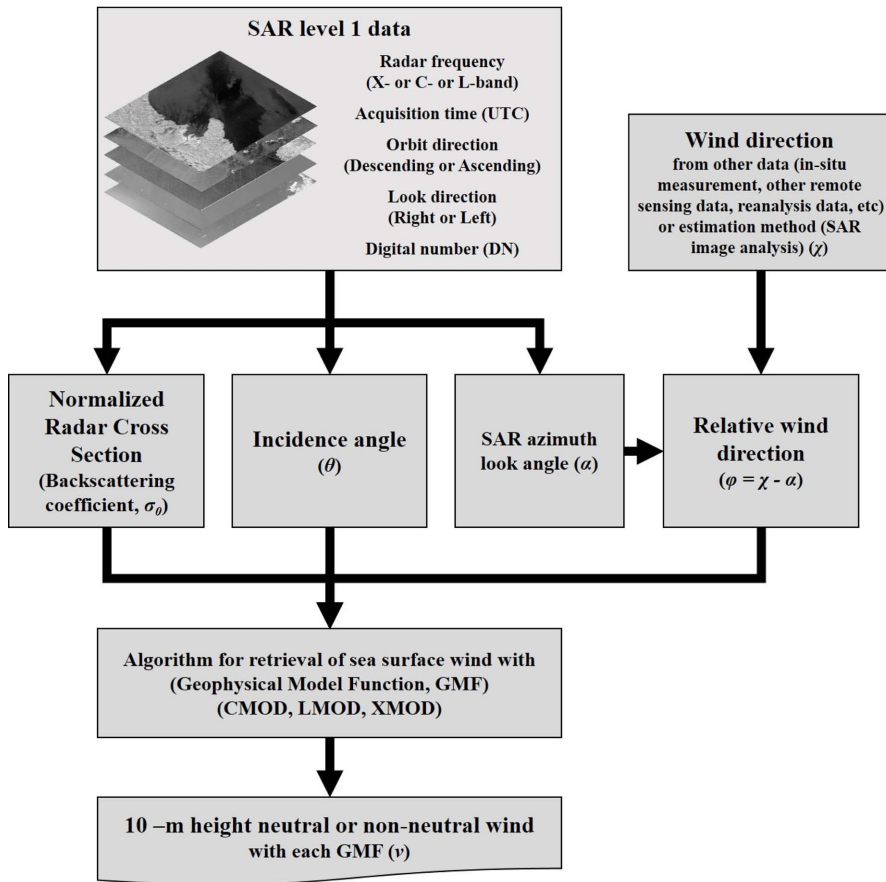


Fig. 4. Flow diagram for retrieval of sea surface wind from SAR image.

and Ohshima, 2011; Wakabayashi et al., 2013)가 주류를 이루고 있으며, 일부의 연구만이 해상풍 연구 (Isoguchi and Shimada, 2007; Isoguchi and Shimada, 2009; Kim et al., 2012)에 초점을 맞추고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 LMOD 함수는 ALOS-1 PALSAR-1 HH 편파 자료를 ASCAT 자료와 National Data Buoy Center (NDBC)에서 제공하는 부이 자료와의 일치점 자료를 기반으로 개발된 LMOD2009 (Isoguchi and Shimada, 2009)이고, 관계식은 다음과 같다:

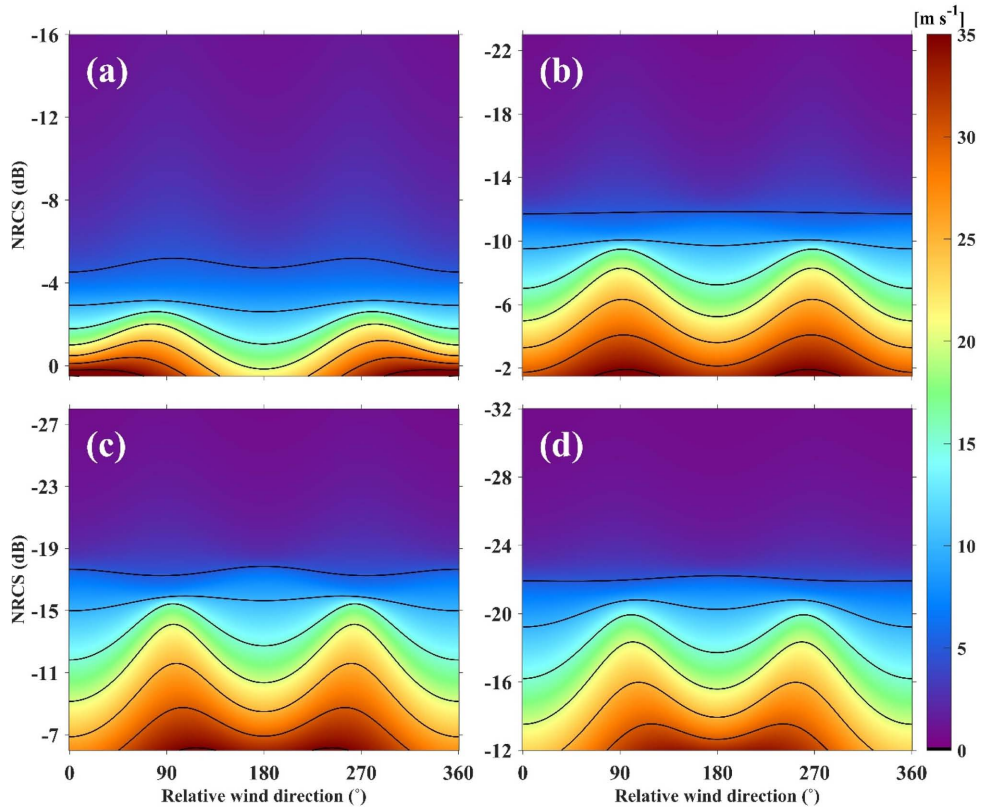
$$\sigma_0(\text{dB}) = 10\log_{10}(A_0[1 + A_1\cos\phi + A_2\cos 2\phi]) \quad (4)$$

$\sigma_0$ 는 dB단위의 후방산란계수,  $\phi$ 는 레이더 방위각에 대한 상대 방향을 가리킨다.  $A_0$ 는 풍속의 규모를 결정하는 항이고,  $A_1$ 은  $180^\circ$  차이가 나는 상대 풍향을 구분하기 위한 항을 의미한다.  $A_2$ 는 상대 풍향이  $90^\circ$  또는  $270^\circ$ 인 경우와  $0^\circ$ 인 경우와의 분리를 위한 항을

의미하고,  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ 는 풍속, 입사각, 33개의 상수에 의해 정의된다. LMOD2009는  $20 \text{ m s}^{-1}$  미만의 풍속과  $17^\circ$ 에서  $43^\circ$ 까지의 입사각 조건에서 정확한 산출이 가능하며, 상세한 설명은 Isoguchi and Shimada (2009)에 기재되어 있다.

Fig. 5는 LMOD2009의 특정 입사각에서 상대 풍향과 후방산란계수에 따른 풍속의 분포를 나타낸 것이다. 입사각이  $18^\circ$ 인 경우, upwind (레이더의 방위각과 풍향이 일치하는 경우)가 downwind (레이더의 방위각과 풍향이  $180^\circ$  차이 나는 경우)보다 후방산란계수가 낮은 것으로 나타났다(Fig. 5a). 하지만, 입사각이 증가하면서 upwind와 downwind의 후방산란계수 차이는 감소하였고, 입사각이  $26^\circ$ 인 경우, upwind와 downwind의 후방산란계수가 대칭성을 보였으며(Fig. 5b), 입사각이 증가하면서 upwind와 downwind의 후방산란계수 크기가 역전되어 비대칭성(asymmetry)이 강조되는 것으로 나타났다(Fig. 5c, 5d). upwind와





**Fig. 5.** Distributions of estimated wind speeds as a function of relative wind direction and NRCS at given incidence angles of (a) 18°, (b) 26°, (c) 34°, and (d) 42° using LMOD2009.

crosswind(레이더의 방위각과 풍향이 90° 차이나는 경우)의 이방성(anisotropy)은 입사각이 증가할수록 두드러졌지만, downwind와 crosswind의 이방성은 입사각이 감소할수록 두드러졌다. 또한, 풍속이 높을수록 후방산란계수의 변화에 대한 풍속의 변화는 증가하였고, 이러한 효과는 입사각이 작을수록 더 극명해지는 것으로 나타났다. 이는 입사각이 작고 풍속이 높을수록 정확한 풍속을 산출하기 위해서는 더 정교한 후방산란계수가 필요하다는 것을 의미한다.

### C-band GMFs

C-band (5250-850 MHz) SAR 자료는 풍향 분석에 가장 활발하게 사용되는 자료로, 그에 적용가능한 CMOD 함수 또한 다양하다. 가장 활발하게 쓰이고 있는 함수는 CMOD4 (Stoffelen and Anderson, 1997), CMOD\_IFR2 (Quilfen et al., 1998), CMOD5 (Hersbach et al., 2005; Hersbach et al., 2007), CMOD5.N (Hersbach, 2010), CMOD5.Na (Verspeck

et al., 2012)로, 모두 VV편파 경험식이다. CMOD4와 CMOD5는 비중성(non-neutral) 10-m 풍속을 산출하는 함수인 반면에 CMOD\_IFR2, CMOD5.N, CMOD5.Na는 대기의 안정성을 고려한 중성(neutral) 10-m 풍속을 산출하는 함수이다(Quilfen et al., 2004; Hersbach, 2010; Takeyama et al., 2013). CMOD4는 ERS-1 산란계 관측 자료와 ECMWF 재분석 바람장 자료, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 부이 자료를 기반으로 개발된 함수로, 관계식은 다음과 같다:

$$\sigma_0(\text{dB}) = 10 \log_{10}(b_0[1 + b_1 \cos \phi + b_2 \tanh b_2 \cos 2\phi]^{1.6}) \quad (5)$$

$\theta$ 는 입사각을 나타내며,  $b_0$ 는 풍속의 규모,  $b_1$ 은 upwind와 downwind의 비대칭성,  $b_2 \tanh b_2$ 는 upwind와 crosswind의 이방성을 위한 항이다. 이를 계산하기 위해서 18개의 상수와 입사각, 풍속이 입력 자료로 사용되며,  $b_0$  계산에는 입사각에 대한 순람표(lookup table)가 활용된다. 상세한 설명은 Stoffelen and



Anderson (1997)에 기재되어 있다.

CMOD\_IFR2는 ERS 산란계 자료와 부이와의 일치점 자료를 기반으로 개발된 함수로, 관계식은 다음과 같다:

$$\sigma_0(\text{dB}) = 10\log_{10}(10^{\alpha+\beta\sqrt{V}} [1 + b_1\cos\phi + b_2\tanh b_2\cos 2\phi]) \quad (6)$$

$$V = V_m + V_{bias} \quad (7)$$

$V$ 는 풍속,  $10^{\alpha+\beta\sqrt{V}}$ 는 풍속의 규모,  $b_1$ 은 upwind와 downwind의 비대칭성,  $\tanh b_2$ 는 upwind와 crosswind의 이방성을 위한 항을 의미한다. 이를 계산하기 위해서 25개의 상수와 풍속, 입사각이 입력 자료로 사용된다. 다른 GMF와는 다르게 GMF에 의해 추정된 해상풍을 식 (7)을 기반으로 수정되며,  $V_m$ 은 추정 풍속,  $V_{bias}$ 는 풍속에 따른 잔차항을 의미한다. Quilfen et al. (1998)은 이에 대한 상세한 설명을 제시하였다.

CMOD5는 ERS-2 산란계 자료와 ECMWF 자료를 비교하여 개발된 함수로, CMOD4가 입사각이 작고  $25 \text{ m s}^{-1}$  이상의 풍속에서는 후방산란계수가 과소 추정되고, 극한 풍속 조건에서는 후방산란계수를 과대 추정하는 단점을 보완하였으며, 관계식은 다음과 같다:

$$\sigma_0(\text{dB}) = 10\log_{10}(B_0[1 + B_1\cos\phi + B_2\cos 2\phi]^{1.6}) \quad (8)$$

$B_0$ 는 풍속의 규모,  $B_1$ 은 upwind와 downwind의 비대칭성,  $B_2$ 는 upwind와 crosswind의 이방성을 위한 항이다. 28개의 상수, 입사각, 풍속에 의해 계산되며, 상세한 설명은 Hersbach et al. (2007)에 기재되어 있다.

CMOD5은 비중성 표면 바람을 산출하지만, CMOD5.N은 중성 표면 바람을 산출하기 위해 개발한 알고리즘으로, ASCAT과 ERS-2 산란계 자료와 ECMWF 자료를 비교하여 개발되었다. 관계식은 동일하지만, CMOD5 알고리즘 관계식에 사용되는 28개의 계수를 조정하였고, 상세한 설명은 Hersbach (2010)에 기재되어 있다.

CMOD5.Na는 CMOD5.N에서 풍속의 규모를 결정하는 변수에 입사각에 의한 잔차가 존재함을 증명하여 수정한 알고리즘으로, ASCAT 자료와 ECMWF 자료를 비교하여 개발되었다. CMOD5.N과 관계식은 동일하지만 입사각에 의한 잔차 수정항을 추가한 형태로, 관계식은 다음과 같다:

$$\text{CMOD5.Na} = \text{CMOD5.N} + B_0^{corr} \quad (9)$$

$B_0^{corr}(\theta)$ 는 잔차 수정항으로 입사각에 대해 경험적으로 도출된 3차 다항식으로 표현되며, 상세한 설명은 Verspeek et al. (2012)에 기재되어 있다.

Fig. 6은 상대 풍향, 입사각, 풍속에 따른 CMOD 함수별 후방산란계수 추정값의 분포를 나타낸 것이다 (Jang et al., 2019). Fig. 6a와 6b는 각각 입사각이  $29.1^\circ$ 와  $46.0^\circ$ 이고, 풍속이  $20 \text{ m s}^{-1}$ 일 때, CMOD에 의해 계산된 상대 풍향과 후방산란계수의 관계를 나타낸다. upwind와 crosswind의 이방성은 입사각에 관계없이 두드러졌지만, upwind와 downwind의 비대칭성은 입사각이 증가하면서 뚜렷해지는 것으로 나타났다. Fig. 6c와 6d는 각각 입사각이  $29.1^\circ$ 와  $46.0^\circ$ 이고, 상대 풍향이  $0^\circ$ 일 때, CMOD에 의해 계산된 풍속과 후방산란계수의 관계를 나타낸다.  $5 \text{ m s}^{-1}$  이하의 풍속에서는 모든 CMOD 함수가 상이한 분포를 보였지만,  $15 \text{ m s}^{-1}$  이상의 풍속에서는 CMOD5, CMOD5.N, CMOD5.Na 함수가 유사한 분포를 보였고, CMOD4, CMOD\_IFR2 함수가 유사한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 입사각이 증가할수록 낮은 풍속에서의 분포는 유사한 것으로 나타났지만, 높은 풍속에서의 분포 차이는 더 극명해지는 것으로 나타났다.

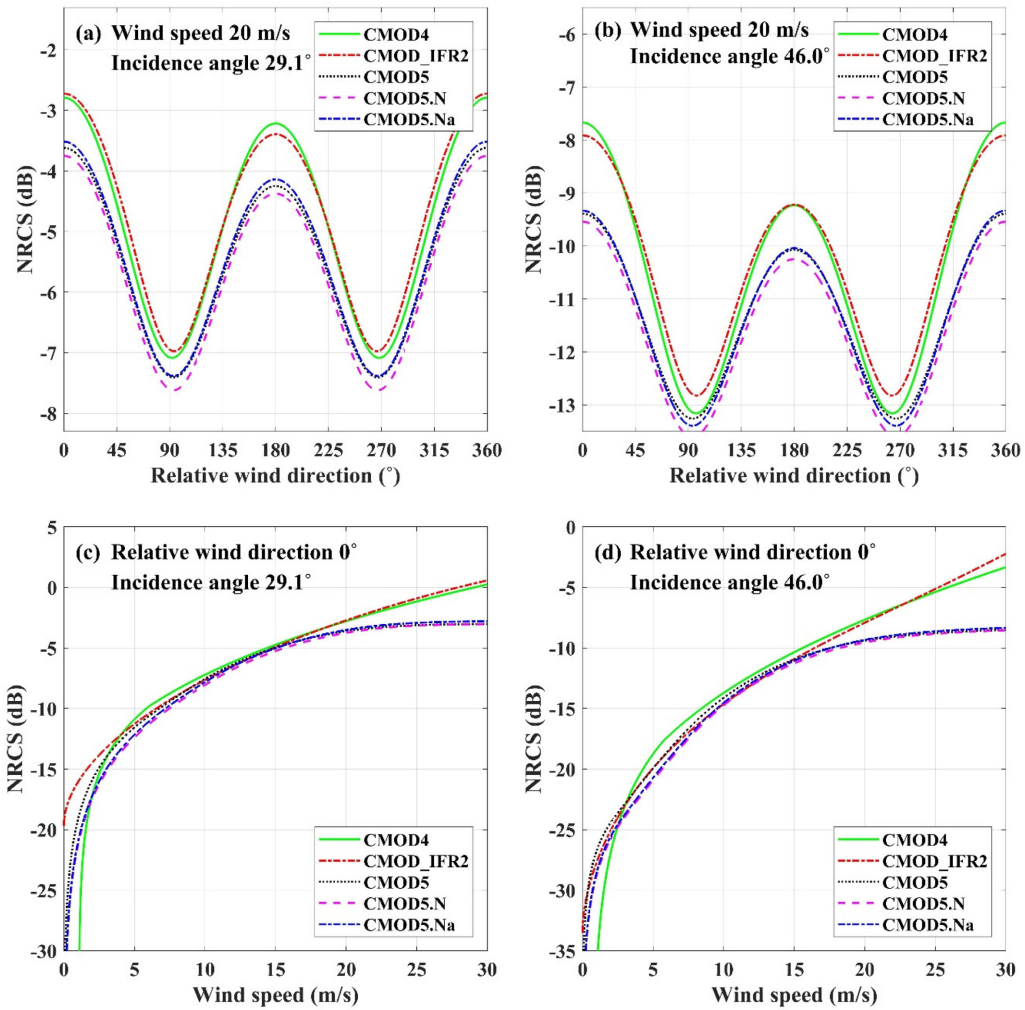
### X-band GMFs

X-band (8.5-10.4 GHz) SAR 관측 자료에 적용가능한 GMF는 DLR에서 TerraSAR-X와 TanDEM-X 자료를 기반으로 개발한 XMOD2-DLR (Li and Lehner, 2013)과 ASI에서 COSMO-SkyMed 자료를 기반으로 개발한 XMOD2-ASI(Nirchio and Venafrà, 2013)가 일반적으로 활용되며, 모두 VV 편파 경험식이다.

XMOD2-DLR은 TerraSAR-X와 TanDEM-X 자료를 NDBC 부이 자료와의 비교를 통해서 개발된 경험식으로 다음과 같이 표현된다:

$$\sigma_0(\text{dB}) = 10\log_{10}(B_0[1 + B_1\cos\phi + B_2\cos 2\phi]^{1.6}) \quad (10)$$

함수의 기본적인 토대는 CMOD5와 CMOD5.N과 동일하기 때문에  $B_0$ 는 풍속의 규모,  $B_1$ 은 upwind와 downwind의 비대칭성,  $B_2$ 는 upwind와 crosswind의 이방성을 위한 항을 의미한다. 하지만  $B_1$ 에 대한 식을 수정하였고, 32개의 상수, 입사각, 풍속에 의해 계산되며, 상세한 설명은 Li and Lehner (2013)에 기재되어 있다.



**Fig. 6.** Distribution of the estimated NRCS as a function of relative wind direction at a given incidence angle (a)  $29.1^\circ$  and (b)  $46.0^\circ$  with the wind speed of  $20 \text{ m s}^{-1}$  using the CMOD functions, and distribution of the estimated NRCS as a function of wind speed at a given incidence angle (c)  $29.1^\circ$  and (d)  $46.0^\circ$  with the relative wind direction of  $0^\circ$  using the CMOD functions. Source: Jang et al. (2019).

XMOD2-ASI는 COSMO-SkyMed 자료를 QuikSCAT (Quick Scatterometer) 자료와 NCEP 재분석 대기 모델 자료와의 일치점 자료를 기반으로 개발된 경험식으로, NDBC 부이 자료를 통해 정확도가 검증되었으며, 다음과 같이 표현된다:

$$\sigma_0(\text{dB}) = 10\log_{10}(B_0[1 + B_1\cos\phi + B_2\cos 2\phi]) \quad (11)$$

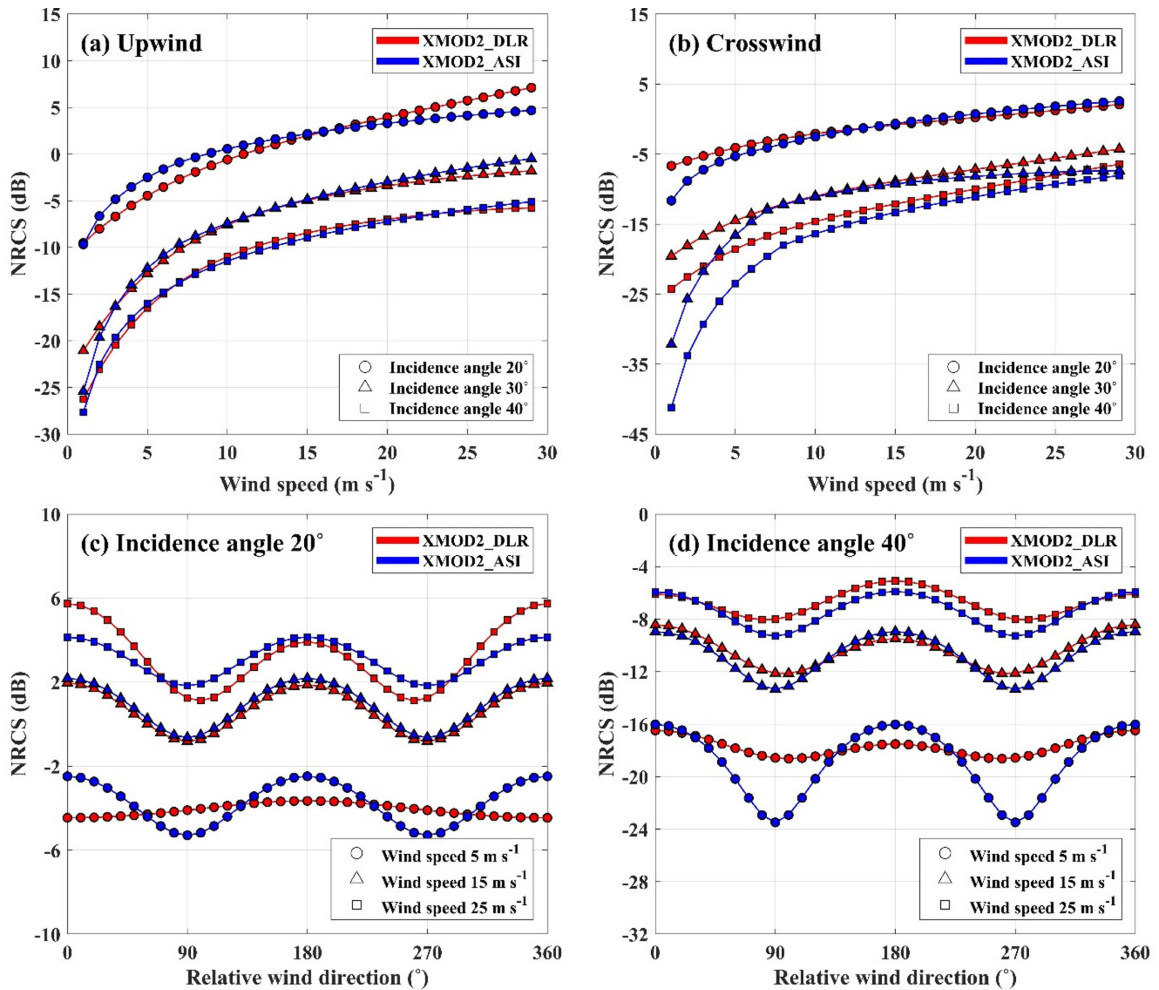
$$B_0 = 10^\beta \nu^\gamma \quad (12)$$

$$B_1 = c_7 + c_8\theta + c_9\theta^2 + (c_{10} + c_{11}\theta + c_{12}\theta^2)\nu \quad (13)$$

$$B_2 = c_{13} + c_{14}\theta + c_{15}\theta^2 + (c_{16} + c_{17}\theta + c_{18}\theta^2)\nu \quad (14)$$

ASI에서 독자적으로 개발되었기 때문에 CMOD5, CMOD5.N, XMOD2-DLR과는 다르게 로그 안에서 1.6 제곱을 적용되지 않는 것이 차별점이다.  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ 는 18개의 상수와 입사각, 풍속에 의해 계산되며, 상세한 설명은 Nirchio and Venafrà (2013)에 기재되어 있다.

Fig. 7은 상대 풍향, 입사각, 풍속에 따른 XMOD2-DLR과 XMOD2-ASI의 후방산란계수 추정값의 분포를 나타낸다. 상대 풍향이  $0^\circ$ 인 경우 입사각이 증가할수록, 상대 풍향이  $90^\circ$ 인 경우 입사각이 감소할수록 XMOD2-DLR과 XMOD2-ASI의 추정값이 유사해지는 것으로 나타났다(Fig. 7a, 7b). 입사각이  $20^\circ$ 인



**Fig. 7.** Distribution of the estimated NRCS as a function of wind speed at a given incidence angle  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ , and  $40^\circ$  with the relative wind direction of (a)  $0^\circ$  and (b)  $90^\circ$  using the XMOD functions, and distribution of the estimated NRCS as a function of relative wind direction at a given incidence angle (c)  $20^\circ$  and (d)  $40^\circ$  with the wind speed of 5, 15, and  $25 \text{ m s}^{-1}$  using the XMOD functions.

경우, 풍속이  $15 \text{ m s}^{-1}$ 일 때 upwind와 downwind가 대칭을 이루는 것으로 나타났지만, 풍속이 증가할수록 upwind의 후방산란계수 추정값이 증가하여 downwind와 역전되는 것으로 나타났다(Fig. 7c). 입사각이  $40^\circ$ 인 경우, 풍속이  $15 \text{ m s}^{-1}$ 일 때 upwind와 downwind가 대칭을 이루는 것으로 나타났지만, 풍속이 증가할수록 downwind의 후방산란계수 추정값이 증가하여 upwind와 역전되는 것으로 나타났다(Fig. 7d). 입사각에 관계없이 upwind/downwind와 crosswind의 이방성은 XMOD2-ASI는 풍속이 감소할수록 두드러지는 것으로 나타났지만, XMOD2-DLR은 풍속이 증가할수록 두드러지는 것으로 나타났다.

### 해상풍 산출 정확도 검증

Table 1은 SAR 센서가 활용하는 파장, 즉 밴드에 따른 해상풍 정확도 평가에 관한 연구를 정리한 것이다. 같은 자료를 활용하여 해상풍을 산출하더라도 영상 관측 모드(mode), 적용한 GMF의 종류, 정확도 비교 기준 자료(e.g., 대기 수치 모델 자료, 산란계 관측 자료, 해양 부이 실측 자료), 정확도 비교를 위한 전처리 방법(e.g., 스펁클 잡음(speckle noise) 제거 방법, 선박 화소 제거 방법, 격자(grid) 크기 설정 방법 등), 상대 풍향 정보 산출 방법 등에 따라 계산된 정확도가 달라진다.

L 밴드 SAR 탑재 인공위성인 ALOS-1 PALSAR-

**Table 1.** Accuracy (root-mean-square error (RMSE), standard deviation (STD), bias, and correlation coefficient (Corr.)) of the wind speed derived from SAR data with respect to reference, satellite, observation mode, polarization, GMF, and accuracy based on the previous studies

Band type	Reference	Data (Satellite and observation mode)	Polarization	GMF	Accuracy				
					Matchup no.	RMSE ( $\text{m s}^{-1}$ )	STD ( $\text{m s}^{-1}$ )	Bias ( $\text{m s}^{-1}$ )	Corr.
L-band	Kim et al. (2012)	ALOS-1 PALSAR-1 (ScanSAR mode)	HH	LMOD2009	-	2.16- 3.62	-	-	-
	Isoguchi and Shimada (2016)	ALOS-2 PALSAR-2	HH	LMOD2009	22209	2.33	-	0.23	-
	Isoguchi et al. (2019)	ALOS-2 PALSAR-2	HH	LMOD2009	84904	2.75	-	-0.35	-
C-band	Monaldo et al. (2001)	Radarsat-1 (ScanSAR mode)	HH	CMOD4	317	-	1.83	1.06	-
	Hasager et al. (2004)	ERS-2	VV	CMOD4 and CMOD_IFR2	56	-	1.33-1.65	-	0.74-0.80
	Beaucage et al. (2007)	Radarsat-1 (ScanSAR mode)	HH	CMOD_IFR2	19811	2.07	2.07	-0.13	0.79
	Yang et al. (2011)	Envisat ASAR (IMM and WSM mode)	VV	CMOD5	25354	-	1.16-1.77	-0.69-0.85	-
	Zhang et al. (2011)	Radarsat-2 (Fine quad-pol mode)	HH and VV	CMOD4, CMOD_IFR2, CMOD5, and CMOD5.N	877	-	1.77-1.87	0.19-0.51	-
	Komarov et al. (2012)	Radarsat-2 (ScanSAR mode)	VV and VH	CMOD_IFR2	257-313	1.13-1.51	-	-0.27-0.55	0.84-0.89
	Hasager et al. (2015)	Envisat ASAR (WSM mode)	HH and VV	CMOD_IFR2, CMOD5, and CMOD5.N	149-197	1.26-1.47	-	-	0.81-0.88
	Jadish et al. (2018)	RISAT-1 (CRS and MRS mode)	HH	CMOD_IFR2, CMOD5, and CMOD5.N	2409	1.58-1.99	1.20-1.53	-1.55- -0.38	0.72-0.91
	Jang et al. (2019)	Sentinel-1A/B (IW mode)	VV	CMOD4, CMOD_IFR2, CMOD5, CMOD5.N, and CMOD5.Na	807	1.65-1.83	1.64-1.72	-0.64-0.31	0.88-0.89
	Grieco et al. (2015)	COSMO-SkyMed	VV	XMOD2-ASI and XMOD2-DLR	20	1.43-1.65	-	0.10-0.30	0.81-0.87
X-band	Shao et al. (2016)	TerraSAR-X/ TanDEM-X (Stripmap mode)	HH and VV	XMOD2-DLR	56	1.79-2.31	-	0.68-0.93	-
	Jang et al. (2018)	KOMPSAT-5 (ES mode)	VV	XMOD2-DLR	18	2.41-2.74	-	-1.19- -0.13	-

1과 ALOS-2 PALSAR-2를 활용한 해상풍 관련 연구는 일부의 연구에 의해서만 이루어지고 있고, 평균 제공근 오차(root mean square error, RMSE)가 2.16-3.62  $\text{m s}^{-1}$ 인 것으로 나타나 NOAA에서 권장하는 해상풍 정확도인 2  $\text{m s}^{-1}$ 를 만족하지 못하는 수준인 것으로 나타났다(Kim et al., 2012; Isoguchi and Shimada, 2016; Isoguchi et al., 2019). 다른 밴드를

사용하는 SAR에 비해 낮은 정확도는 ALOS PALSAR 인공위성 자료의 영상 오류로부터 기인한 결과이다. ALOS PALSAR 자료는 레이더 간섭 현상에 의한 반복적인 줄무늬와 같은 영상 오류가 알려지지 않은 원인에 의해 생성되고 그에 대한 보정 방법도 개발되었지만(Shimada et al., 1999; Meyer et al., 2013), 추가적인 보정 과정이 개발되어야 할 것

으로 사료된다.

C 밴드 SAR의 경우, 다른 밴드에 비해 가장 적극적으로 개발되고 있어 인공위성의 종류와 그를 활용한 해상풍 산출 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그에 따라 영상에 적용하는 CMOD의 종류도 다양화시켜 해상풍 산출 알고리즘에 따른 정확도까지 비교한 연구도 진행되었다(Monaldo et al. 2001; Hasager et al. 2004; Beaucage et al. 2007; Yang et al., 2011; Zhang et al., 2011; Komarov et al., 2012; Hasager et al., 2015; Jadish et al. 2018; Jang et al., 2019). 평균 제공근 오차는  $1.13\text{--}2.07\text{ m s}^{-1}$ 로 나타났고, 결과의 편차(bias)를 제거하여 계산하는 표준 편차(standard deviation, STD)는  $1.16\text{--}2.07\text{ m s}^{-1}$ 로 나타났다. CMOD는 VV 편파 자료를 기준으로 개발되었기 때문에 HH 편파 자료를 사용하는 경우, VV 편파 자료로 변환하는 편파비(polarization ratio, PR)를 적용하는 과정이 필요하고(Elfouhaily, 1996; Thompson et al., 1998; Liu et al., 2013; Shao et al., 2016), VV 편파 자료만을 활용한 해상풍의 평균 제공근 오차는  $1.13\text{--}1.83\text{ m s}^{-1}$ , 표준 편차는  $1.16\text{--}1.77\text{ m s}^{-1}$ 로 나타나 편파비를 활용하는 것보다 정확하게 해상풍을 모의하였다.

X 밴드 SAR의 경우, 해양 영역 관측 자료의 획득이 어려워 다른 SAR 탑재 인공위성에 비해 일치점 자료(matchup data)의 개수가 적은 것으로 나타났다(Grieco et al. 2015; Shao et al., 2016; Jang et al., 2018). 사용한 자료에 따라 정확도가 달라지고, COSMO-SkyMed 자료의 정확도는 XMOD2의 종류에 따라 달라지지만 평균 제공근 오차가  $1.43\text{--}1.65\text{ m s}^{-1}$ 인 것으로 나타났다. TerraSAR-X/TanDEM-X 자료의 정확도는 평균 제공근 오차가  $1.79\text{--}2.31\text{ m s}^{-1}$ 인 것으로 나타났다. XMOD2는 VV 편파 자료를 기준으로 개발되었기 때문에 HH 편파 자료를 사용하는 경우, 평균 제공근 오차가 증가하는 것으로 나타났고, 편차가 모두 양수로 나타나 실제 풍속보다 과추정하는 것으로 나타났다. KOMPSAT-5 자료의 정확도는  $2.41\text{--}2.74\text{ m s}^{-1}$ 인 것으로 나타났고, 추후 더 정교한 후방 산란계수 산출식이 개발될 경우, 정확도가 상승할 것으로 예상된다.

## 요약 및 결론

이 연구에서는 최근 활용도가 점점 높아지고 있는

인공위성 SAR 영상 자료의 관측 원리 및 자료 처리 방법을 비교하여 제시하였고, SAR 탑재 인공위성의 개발 연혁을 활용 파장대, 개발 기관, 운용 기간에 따라 나열하였다. 특히 해양 환경 분석을 위한 기초 변수인 해상풍을 산출하기 위한 SAR 자료 분석 방법을 중심으로 개괄적으로 요약하여 제시하였고, L-band, C-band, X-band SAR 자료에 적용 가능한 해상풍 산출 함수인 LMOD, CMOD, XMOD에 대해 조사하여 정리하였다. GMF 함수별 특성을 파악하기 위해 상대 풍향, 풍속, 입사각에 따른 후방산란계수의 분포를 계산하여 분석하였고, 각 밴드별 해상풍 산출 정확도에 관한 그 동안의 연구들을 문헌 조사하여 인공위성 자료, GMF, 정확도(평균 제공근 오차, 표준 편차, 편차, 상관 계수)에 따라 정리하였다.

해상풍을 산출하기 위해 SAR 자료에 적용하는 GMF의 구조는 전체적으로 유사하였지만, 사용하는 파장대와 개발 기관에 따라 다른 것을 확인하였다. L 밴드 GMF의 경우, ALOS-1/2 PALSAR-1/2이 HH 편파를 주 관측 편파로 활용하고 있기 때문에 HH 편파 자료를 기반으로 개발되었으며, CMOD와 XMOD는 모두 VV 편파 자료를 기반으로 개발되었다. X 밴드 GMF의 경우, DLR과 ASI에서 개발한 XMOD2-DLR, XMOD2-ASI 두 종류가 존재하며, 각각 TerraSAR-X/TanDEM-X 자료와 COSMO-SkyMed 자료를 기반으로 개발되었으며, 특히 XMOD2-DLR은 CMOD의 구조를 기반으로 개발되었다. C 밴드 GMF의 경우, 해상풍 산출에 가장 일반적으로 활용되기 때문에 개발된 해상풍 산출 모델이 다양하였다. 특히, 해상풍 산출 알고리즘이 개발된 이후에도 지속적인 검증 및 보정을 통해 모델의 오차 특성을 분석 및 개선하여 계속해서 새로운 CMOD가 개발되고 있는 것으로 나타났다.

SAR 자료에 GMF를 적용하여 산출한 해상풍의 정확도는 영상 관측 모드, 적용한 GMF의 종류, 정확도 비교 기준 자료, SAR 자료 전처리 방법, 상대 풍향 정보 산출 방법 등에 따라 변하는 것으로 나타났다. 기존의 연구들에서 규명된 LMOD2009의 정확도는  $2.16\text{--}3.62\text{ m s}^{-1}$ 의 평균 제공근 오차가 나타났고, 이는 ALOS PALSAR 영상에 나타나는 레이더 간섭 현상과 스펙클 잡음에 의한 것으로 사료되며, LMOD2009의 정확도를 평가하기 위해서는 ALOS PALSAR 영상의 보정 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다. CMOD의 경우, GMF에 상관없이  $1.13\text{--}$

$2.07 \text{ m s}^{-1}$ 의 평균 제공근 오차를 보였으며, HH 편파 자료에 편파비를 적용한 연구 결과를 제외하면  $2 \text{ m s}^{-1}$  이하의 정확도를 보여 다른 밴드를 활용한 해상풍에 비해 더 정밀한 해상풍을 산출하는 것으로 나타났다. X 밴드 GMF의 경우, 활용한 SAR 자료에 따라 정확도가 크게 달라졌으며,  $1.43\text{-}2.74 \text{ m s}^{-1}$ 의 평균 제공근 오차를 보였다. KOMPSAT-5의 경우, 해상풍 산출에 필요한 후방산란계수 계산식이 좀 더 정확하게 조정되어야 하며 다른 X 밴드 인공위성 결과에 비해 높은 평균 제공근 오차를 보였고, KOMPSAT-5 자료와 HH 편파 자료를 제외한 XMOD2의 평균 제공근 오차는  $1.43\text{-}1.79 \text{ m s}^{-1}$ 로 나타났다.

본 연구에서는 인공위성 SAR 자료에 활용되는 해상풍 산출 방법 중 가장 일반적으로 활용되고 있는 L, C, X 밴드의 GMF에 대해 분석하였고, 이를 다양한 인공위성 영상에 적용하여 해상풍의 정확도를 검증한 연구 결과를 정리하였다. 또한, 각 밴드별 일반적으로 활용되고 있는 GMF를 조사하여 모의하였고, 상대 풍향, 입사각, 풍속에 따른 후방산란계수의 변화를 분석하였으며, 각 GMF 및 인공위성 SAR 자료에 따른 정확도를 기존 연구들을 기반으로 정리하여 제시하였다. 이 연구에서는 SAR 자료를 활용한 해상풍 산출에 대한 연구자들의 접근성을 향상시키고, 이를 통해 산출한 고해상도 해상풍 자료가 한반도 인근해 해역 분석에 활발하게 활용될 수 있도록 개괄적인 연구 동향을 요약하였다. 본 연구는 추후 한반도 주변 해역에 대해 SAR 탑재 인공위성별 정확도 및 오차 특성 분석을 통해 한반도 해역에 최적화된 해상풍 산출 알고리즘 개발에 기여하고, 더 정확한 해상풍 산출 결과가 SAR 자료의 해양 분야 활용 가능성을 더욱 증대시킬 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 기상청 “기상·지진 See-At 기술개발연구사업(KMI2018-05110)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- Beaucage, P., Glazer, A., Choinsard, 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.
- Chan, Y.K. and Koo, V.C., 2008, An introduction to synthetic aperture radar (SAR). *Progress In Electromagnetics Research B*, 2, 27-60.
- Cipollini, P., Benveniste, J., Bouffard, J., Emery, W., Gommenginger, C., Griffin, D., Hoyer, J., Kurapov, A., Madsen, K., Mercier, F., Miller, L., Pascual, A., Ravichandran, M., Shillington, F., Snaith, H., Strub, P.T., Vandemark, D., Vignudelli, S., Wilkin, J., Woodworth, P., and Pascual, A., 2010, The role of altimetry in coastal observing systems. In *Ocean information for society: sustaining the benefits, realizing the potential*, *Proceedings of OceanObs*, 9, 181-191.
- Cornillon, P. and Park, K., 2001, Warm core ring velocities inferred from NSCAT. *Geophysical Research Letters*, 28(4), 575-578.
- Ebuchi, N., 1999, Statistical distribution of wind speeds and directions globally observed by NSCAT. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C5), 11393-11403.
- Elfouhaily, T., 1996, Physical modeling of electromagnetic backscatter from the ocean surface: Application to retrieval of wind fields and wind stress by remote sensing of the marine atmospheric boundary layer. Ph.D. dissertation, University of Paris VII, Paris, France.
- Graf, J.E., Tsi, W.Y., and Jones, L., 1998, Overview of QuikSCAT mission-a quick deployment of a high resolution, wide swath scanning scatterometer for ocean wind measurement. In *Proceedings IEEE Southeastcon '98' Engineering for a New Era*, 314-317.
- Grieco, G., Nirchio, F., and Migliaccio, M., 2015, Application of state-of-the-art SAR X-band geophysical model functions (GMFs) for sea surface wind (SSW) speed retrieval to a data set of the Italian satellite mission COSMO-SkyMed. *International Journal of Remote Sensing*, 36(9), 2296-2312.
- Hasager, C.B., Dellwik, E., Nielsen, M., and Furevik, B.R., 2004, Validation of ERS-2 SAR offshore wind-speed maps in the North Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 25(19), 3817-3841.
- Hasager, C.B., Mouche, A., Badger, M., Bingöl, F., Karagali, I., Driesenaar, T., Stoffelen, A., Peña, A., and Longépé, N., 2015, Offshore wind climatology based on synergetic use of Envisat ASAR, ASCAT and QuikSCAT. *Remote Sensing of Environment*, 156, 247-263.
- 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.
- Hersbach, H., Stoffelen, A., and De Haan, S., 2005, The

Beaucage, P., Glazer, A., Choinsard, J., Yu, W., Bernier, M., Benoit, R., and Lafrance, G., 2007, Wind assessment in a coastal environment using synthetic



- improved C-band geophysical model function CMOD5. In *Envisat and ERS Symposium*, 572.
- 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).
- Isoguchi, O., Ishizuka, K., Tadono, T., Motohka, T., and Shimada, M., 2019, Effect of Faraday Rotation on L-band ocean normalized radar cross section and wind speed detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- Isoguchi, O. and Shimada, M., 2007, An L-band model function for the ocean-normalized radar cross section derived from PALSAR. In *Proceeding of 1st Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program*, 19-23.
- Isoguchi, O. and Shimada, M., 2009, An L-band ocean geophysical model function derived from PALSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7), 1925-1936.
- Isoguchi, O. and Shimada, M., 2016, Detection of wind fields from PALSAR-2. In *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2016 Proceedings*, 2209-2211.
- Jagdish, Kumar, S.A., Chakraborty, A., and Kumar, R., 2018, Validation of wind speed retrieval from RISAT-1 SAR images of the North Indian Ocean. *Remote Sensing Letters*, 9(5), 421-428.
- James, R. J., 1989, A history of radar. *IEE Review*, 35(9), 343-349.
- Jang, J.C. and Yang, D., 2018, Validation of sea surface wind estimated from KOMPSAT-5 backscattering coefficient data. *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-3), 1383-1398.
- Jang, J.C., Park, K.A., Mouche, A.A., Chapron, B., and Lee, J.H., 2019, Validation of sea surface wind from Sentinel-1A/B SAR data in the coastal regions of the Korean Peninsula. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- Johansson, A.M., Brekke, C., Spreen, G., and King, J.A., 2018, X-, C-, and L-band SAR signatures of newly formed sea ice in Arctic leads during winter and spring. *Remote Sensing of Environment*, 204, 162-180.
- Katsaros, K.B. and Brown, R.A., 1991, Legacy of the Seasat mission for studies of the atmosphere and air-sea-ice interactions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 72(7), 967-982.
- 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, T.S., Park, K.A., Li, X., Lee, M., Hong, S., Lyu, S.J., and Nam, S., 2015, Detection of the Hebei Spirit oil spill on SAR imagery and its temporal evolution in a coastal region of the Yellow Sea. *Advances in Space Research*, 56(6), 1079-1093.
- 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*, 10(6), 2599-2607.
- Koch, W., 2004, Directional analysis of SAR images aiming at wind direction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(4), 702-710.
- 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.
- 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.
- Liu, G., Yang, X., Li, X., Zhang, B., Pichel, W., Li, Z., and Zhou, X., 2013, A systematic comparison of the effect of polarization ratio models on sea surface wind retrieval from C-band synthetic aperture radar. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3), 1100-1108.
- 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., 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.
- 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.
- Li, X.M. and Lehner, S., 2013, Algorithm for sea surface wind retrieval from TerraSAR-X and TanDEM-X data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2928-2939.
- Mai, M., Zhang, B., Li, X., Hwang, P.A., and Zhang, J.A., 2016, Application of AMSR-E and AMSR2 low-frequency channel brightness temperature data for hurricane wind retrievals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(8), 4501-4512.
- Massonnet, D. and Souyris, J.C., 2008, *Imaging with synthetic aperture radar*. EPFL press.
- Merrifield, M.A. and Maltrud, M.E., 2011, Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification. *Geophysical Research Letters*, 38(21).

- Meyer, F.J., Mahoney, A.R., Eicken, H., Denny, C.L., Druckenmiller, H.C., and Hendricks, S., 2011, Mapping arctic landfast ice extent using L-band synthetic aperture radar interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3029-3043.
- Meyer, F.J., Nicoll, J.B., and Doulgeris, A.P., 2013, Correction and characterization of radio frequency interference signatures in L-band synthetic aperture radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(10), 4961-4972.
- Monaldo, F.M., Thompson, D.R., Beal, R.C., Pichel, W.G., and Clemente-Colón, P., 2001, Comparison of SAR-derived wind speed with model predictions and ocean buoy measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(12), 2587-2600.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., and Papathanassiou, K.P., 2013, A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1), 6-43.
- Mouche, A.A., Chapron, B., Zhang, B., and Husson, R., 2017, Combined co-and cross-polarized SAR measurements under extreme wind conditions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(12), 6746-6755.
- Nirchio, F. and Venafrà, S., 2013, XMOD2-An improved geophysical model function to retrieve sea surface wind fields from Cosmo-Sky Med X-band data. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1), 583-595.
- Oliver, C. and Quegan, S., 2004, *Understanding synthetic aperture radar images*. SciTech Publishing.
- Oliver, C.J., 1989, Synthetic-aperture radar imaging. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 22(7), 871.
- Park, K., Cornillon, P., 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).
- Park, K., Park, J.J., Jang, J.C., Lee, J.H., Oh, S., and Lee, M., 2018, Multi-spectral ship detection using optical, hyperspectral, and microwave SAR remote sensing data in coastal regions. *Sustainability*, 10(11), 4064.
- Quilfen, Y., Chapron, B., Collard, F., and Vandemark, D., 2004, Relationship between ERS scatterometer measurement and integrated wind and wave parameters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(2), 368-373.
- 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.
- Rignot, E., 2008, Changes in West Antarctic ice stream dynamics observed with ALOS PALSAR data. *Geophysical Research Letters*, 35(12).
- 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.
- Rodriguez, E., Gaston, R.W., Durden, S.L., Stiles, B., Spencer, M., Veilleux, L., Hughes, R., Fernandez, D.E., Chan, S., Veleva, S., and Dunbar, R.S., 2009, A scatterometer for XOVWM, the extended ocean vector winds mission. In 2009 IEEE Radar Conference, 1-4.
- Shao, W., Zhang, Z., Li, X., and Wang, W., 2016, Sea surface wind speed retrieval from TerraSAR-X HH polarization data using an improved polarization ratio model. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(11), 4991-4997.
- Shimada, M., Nakatani, H., Isono, K., and Kawada, T., 1999, Removal of the interference appeared within the SAR images. *Advances in Space Research*, 23(8), 1505-1508.
- Skolnik, M.I., 1980, *Introduction to radar systems*. NY, New York: McGraw-Hill.
- Spreen, G., Kwok, R., and Menemenlis, D., 2011, Trends in arctic sea ice drift and role of wind forcing: 1992–2009. *Geophysical Research Letters*, 38(19).
- 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.
- Takeyama, Y., Ohsawa, T., Kozai, K., Hasager, C., and Badger, M., 2013, Comparison of geophysical model functions for SAR wind speed retrieval in Japanese coastal waters. *Remote Sensing*, 5(4), 1956-1973.
- Tamura, T. and Ohshima, K.I., 2011, Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C7).
- Tang, W., Liu, W.T., and Stiles, B.W., 2004, Evaluation of high-resolution ocean surface vector winds measured by QuikSCAT scatterometer in coastal regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(8), 1762-1769.
- Thompson, D.R., Elfouhaily, T.M., and Chapron, B., 1998, Polarization ratio for microwave backscattering from the ocean surface at low to moderate incidence angles. In 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. IGARSS'98 Proceedings, 3, 1671-1673.
- 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.
- 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.
- Wakabayashi, H., Matsuoka, T., Nakamura, K., and Nishio,

- F., 2004, Polarimetric characteristics of sea ice in the Sea of Okhotsk observed by airborne L-band SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11), 2412-2425.
- Wakabayashi, H., Mori, Y., and Nakamura, K., 2013, Sea ice detection in the sea of Okhotsk using PALSAR and MODIS data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3), 1516-1523.
- Xu, L., Zhang, H., Wang, C., Zhang, B., and Tian, S., 2016, Compact polarimetric SAR ship detection with m-ä decomposition using visual attention model. *Remote Sensing*, 8(9), 751.
- Yang, X., Li, X., Pichel, W.G., and Li, Z., 2011, Comparison of ocean surface winds from ENVISAT ASAR, MetOp ASCAT scatterometer, buoy measurements, and NOGAPS model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(12), 4743-4750.
- Yuan, X., Martinson, D.G., and Liu, W.T., 1999, Effect of air-sea-ice interaction on winter 1996 Southern Ocean subpolar storm distribution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D2), 1991-2007.
- 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.
- Zhang, B., Perrie, W., and He, Y., 2011, Wind speed retrieval from RADARSAT-2 quad-polarization images using a new polarization ratio model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C8).
- 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.

---

Manuscript received: June 12, 2019

Revised manuscript received: August 12, 2019

Manuscript accepted: August 14, 2019