L밴드 인공위성 SAR를 이용한 동해 연안 해상풍 산출 및 오차 특성

김태성* · 박경애**† · 최원문* · 홍성욱*** · 최병철*** · 신인철*** · 김경렬****

*서울대학교 과학교육과, **서울대학교 지구과학교육과 / 서울대학교 해양연구소,

***국가기상위성센터 위성분석과, ****서울대학교 지구환경과학부 / 서울대학교 해양연구소

L-band SAR-derived Sea Surface Wind Retrieval off the East Coast of Korea and Error Characteristics

Tae-Sung Kim*, Kyung-Ae Park**†, Won-Moon Choi*, Sungwook Hong***,
Byoung-Cheol Choi***, Inchul Shin*** and Kyung-Ryul Kim****

*Department of Science Education, Seoul National University,

**Department of Earth Science Education / Research Institute of Oceanography, Seoul National University,

***Satellite Analysis Division, National Meteorological Satellite Center,

****School of Earth and Environmental Sciences / Research Institute of Oceanography, Seoul National University

Abstract : Sea surface winds in the sea off the east coast of Korea were derived from L-band ALOS (Advanced Land Observing Satellite) PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) data and their characteristics of errors were analyzed. We could retrieve high-resolution wind vectors off the east coast of Korea including the coastal region, which has been substantially unavailable from satellite scatterometers. Retrieved SAR-wind speeds showed a good agreement with in-situ buoy measurement by showing relatively small an root-mean-square (RMS) error of 0.67 m/s. Comparisons of the wind vectors from SAR and scatterometer presented RMS errors of 2.16 m/s and 19.24°, 3.62 m/s and 28.02° for L-band GMF (Geophysical Model Function) algorithm 2009 and 2007, respectively, which tended to be somewhat higher than the expected limit of satellite scatterometer winds errors. L-band SAR-derived wind field exhibited the characteristic dependence on wind direction and incidence angle. The previous version (L-band GMF 2007) revealed large errors at small incidence angles of less than 21°. By contrast, the L-band GMF 2009, which improved the effect of incidence angle on the model function by considering a quadratic function instead of a linear relationship, greatly enhanced the quality of wind speed from 6.80 m/s to 1.14 m/s at small incident angles. This study addressed that the causes of wind retrieval errors should be intensively studied for diverse applications of L-band SAR-derived winds, especially in terms of the effects of wind direction and incidence angle, and other potential error sources.

Key Words : L-band, Sea Surface Wind, SAR, ALOS PALSAR

요약 : L밴드 ALOS SAR 자료를 활용하여 우리나라 동해 연안해역의 해상풍을 산출하고 오차의 특성을 분석하였다. 그 동안 인공위성 산란계를 이용한 해상풍 산출이 본질적으로 불가능하였던 연안 해역에 대하여 SAR 자료로부터 고해상도 해상풍을 산출할 수 있었다. 산출된 SAR 바람을 해양 부이 자료와 비교한 결

접수일(2012년 9월 16일), 수정일(1차 : 2012년 10월 5일, 2차 : 10월 22일), 게재확정일(2012년 10월 23일).

† 교신저자: 박경애(kapark@snu.ac.kr)

과 0.67 m/s의 작은 오차로 잘 일치함을 보여주었다. 서로 다른 L밴드 ALOS PALSAR GMF 2007 모델과 2009 모델로 산출된 해상풍을 인공위성 산란계 해상풍과 비교한 결과, 풍속과 풍향 각각 2.16 m/s와 19.24°, 3.62 m/s와 28.02°의 제곱평균근오차를 보이며, 인공위성 산란계의 기대 오차보다 다소 큰 경향을 나타냈다. 또한 산출된 L밴드 SAR 바람장은 풍향과 입사각에 대하여 특징적인 의존성을 보였다. L밴드 GMF 2007 모델은 21° 보다 작은 입사각에 대하여 큰 오차를 보인 반면, L밴드 GMF 2009 모델은 입사각에 대한 효과를 선형함수가 아니라 이차함수로 고려하여 주었기 때문에 작은 입사각 범위에서 풍속 오차가 6.8 m/s에서 1.14 m/s로 크게 감소하는 결과를 보였다. 본 연구는 L밴드 SAR 바람장의 다양한 활용을 위해서는 풍향과 입사각 효과, 그리고 다른 잠재적인 오차의 요인을 집중적으로 연구하여야 함을 강조하였다.

1. 서론

해상풍은 해양-대기 상호작용의 가장 중요한 변수 중 하나로서 대기와의 끊임없는 상호작용을 통하여 해양 상층의 열속(heat flux), 해양 혼합층 및 해양 표층 순환에 영향을 미친다. 특히 최근 들어 급격한 기후변화로 인한 지구환경 변화에 관한 관심이 커지면서 해상풍은 대기 중 기체들의 해수 유입 및 교환과정과 해양생지화학 과정을 이해하는데 주요한 역할을 하고 있다.

인공위성을 이용한 해상풍은 1992년 ERS-1(European Remote Sensing Satellite), 1995년 ERS-2, 1997년 NSCAT(NASA SCATterometer), 1999년 QuikSCAT(Quick SCATterometer), 2006년 ASCAT(Advanced SCATterometer) 등 주로 산란계(scatterometer)를 이용하여 얻을 수 있었다. 인공위성 산란계를 통해 2 m/s, 20° 정도의 정확도로 평균적으로 1-2일에 걸쳐 전 지구의 해상풍을 관측할 수 있게 되었다. 산란계 관측은 그동안의 해양조사선에 의한 국지적인 해상풍 관측 자료, 해상풍 관측 연안 부이, 계류 부이 관측 자료 등의 시공간적 한계를 극복함으로써 기존 연구들과 비교될 수 없을 만큼의 큰 성과를 이루어 낼 수 있었다. 그러나 산란계 자료는 상대적으로 낮은 공간해상도(~25 km by 25 km)로 인해 주요 연구 관심 영역이자 인류생활과 밀접한 연관이 있는 연안 지역(<50 km)의 바람장을 관측할 수 없는 한계를 가지고 있다. 특히 한반도 연안역과 같이 시공간 변동성이 큰 해역의 해양현상 특성 파악을 위해서는 고해상도 바람장의 시공간 변동성에 대한 연구가 요구된다.

인공위성 SAR(Synthetic Aperture Radar) 센서는 고해상도 관측 특성을 가지므로 기존 산란계가 얻지 못 하던 연안 지역의 해상풍 자료를 얻을 수 있으며 이를 활용하여 연안을 포함한 한반도 주변 해역 전체의 해상

풍 특성을 이해할 수 있다. 고해상도 바람장 산출이 가능함으로써 기존 바람자료들로 분석할 수 없었던 소규모의 해양현상 연구, 해수면과 대기의 상호작용 이해 등 다양한 해양 연구 분야에 활용될 수 있다. 국내에서도 이러한 SAR의 해양 연구 활용도에 주목하여 그동안 다양한 SAR 활용 해양 변수 산출 연구(김태림, 1999; Kim *et al.*, 2001; 이문진 외, 2007; Kang and Lee, 2007)와 함께 여러 건의 인공위성 SAR를 활용한 고해상도 해상풍 산출 연구가 이루어진 바 있다(Won *et al.*, 1998; Kim and Moon, 2002; 윤홍주 외 2006; 강문경 외, 2007; Kim, 2009; Kim *et al.*, 2010; 황효정, 김현구, 2011; Kim and Park, 2011). 그러나 대부분의 연구들이 C밴드 SAR 해상풍 산출에 집중하여왔다. 해상 SAR 관측이 빈번하지 않고 자료 취득도 매우 제한적이므로 한반도 주변 해역 전체의 고해상도 해상풍 특성 파악을 위해서는 C밴드 뿐만 아니라 L밴드, X밴드 등 다양한 밴드와 다양한 SAR 위성 자료를 활용하여야 한다.

따라서 이를 위해 본 연구에서는 L밴드 인공위성 SAR 자료를 활용하여 우리나라 주변 해역의 고해상도 해상풍을 산출하고 산출 해상풍의 오차 특성을 분석하였다. L밴드 SAR 영상을 활용한 우리나라 주변 해역의 고해상도 해상풍 산출 결과를 통해 적용 알고리즘별 특성을 제시하고, 산란계 및 실측 부이 자료와의 비교분석 연구를 통해 각 요인별 오차특성을 제시하고자 한다.

2. 자료 및 처리방법

1) 인공위성 자료 및 해양관측 자료

본 연구에서는 L밴드 해상풍 산출을 위해 한반도 주

Fig. 1. (a) Location of the ALOS PALSAR data off the east coast of Korea acquired at 02h 05m(UTC) on 11 August 2007, where the star symbol indicates the location of KMA buoy, and (b) distribution of the normalized radar cross section (dB).

Fig. 2. (a) Wind vector cells of QuikSCAT off the Korean coast, where the red and blue circles represent ascending and descending modes for a day, respectively, and (b) SAR image within a QuikSCAT wind vector cell of 25 km by 25 km with only a wind vector as denoted in a white arrow.

변 해역을 관측한 ALOS(Advanced Land Observing Satellite) PALSAR(Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) 영상을 사용하였다. Fig. 1은 2007년 8월 11일 2시 5분(UTC) 동해 연안을 촬영한 ALOS PALSAR 영상으로, 관측영역(Fig. 1(a))과 후방산란계수(backscattering coefficient, σ_0) 영상(Fig. 1(b))을 나타낸다. 이 PALSAR 영상은 HH편파 광역관측모드(ScanSAR Mode)로 촬영되었으며 관측 폭은 350 km, 입사각은 $17.5^\circ - 43.2^\circ$ 이고, 공간해상도는 100 m이다. Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 북한 원산 부근에서는 -20 dB에서 -15 dB까지 매우 낮은 σ_0 값을 보이고 있는데, 이는 2007년도에 발생한 제 6호 태풍

파북(Pabuk)이 통과한 이후에 관측하였기 때문이다 (Park and Kim, 2010). 연안에 비해 외해에서 바람이 매우 강했으며 그로 인해 PALSAR 후방산란계수 분포가 동쪽과 서쪽의 불균형 양상을 보이고 있는 것으로 추정된다.

L밴드 SAR 해상풍 알고리즘을 적용하기 위하여 먼저 풍향 정보가 필요하다. 본 연구에서는 후방산란계수 영상에서 스펙트럼 분석을 통해 직접적으로 산출하지 않고 ECMWF(European Center for Medium-range Weather Forecasts)의 해상풍 재분석자료를 사용하였다. 사용한 ECMWF 재분석자료는 시간해상도는 6시간, 공간해상도는 1.5° 이며 연구 영역의 격자에 적합하

도록 공간적으로 내삽하여 산출된 풍향 정보를 알고리즘에 활용하였다.

PALSAR 풍속 결과를 비교하기 위하여 관측 기간과 일치하는 QuikSCAT 풍속 자료를 활용하였다. Fig. 2(a)에 표시된 붉은 점과 푸른 점은 각각 하루 중 지나가는 QuikSCAT의 Ascending과 Descending 관측점들을 나타낸다. 동해안으로부터 50 km 이내인 곳은 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 인공위성 산란계가 한 점도 관측하지 못하고 있다. 반면에 SAR 영상은 100 m 정도의 공간 해상력을 가지고 연안 해역도 조밀하게 관측할 수 있는 장점이 있다. Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 25 km × 25 km(129.505–129.755° E, 37.565–37.815° N) 영역에 인공위성 산란계는 한 개의 바람벡터(129.63° E, 37.69° N)를 관측하지만 배경 영상으로 표시된 SAR 자료를 활용하면 정밀한 고해상도의 바람장 분포를 획득할 수 있다.

2) L밴드 해상풍 산출 방법

SAR 영상으로부터 해상풍을 산출하기 위해서는 풍속 및 풍향, 입사각, 편파상태에 따른 후방산란계수 관계식을 활용한 모델 함수(model function)를 이용한다. 2006년 L밴드 SAR 탑재 ALOS 위성 운용 시작과 함께 축적된 자료를 바탕으로 L밴드 해상풍 추출 알고리즘 개발연구가 활발히 이루어지기 시작하였다. 현재 L밴드 SAR 해상풍 산출의 경우 HH편파 PALSAR 자료를 기반으로 한 L밴드 HH편파 GMF(Geophysical Model Function) 알고리즘(Isoguchi and Shimada, 2007; Isoguchi and Shimada, 2009)이 가장 널리 쓰이고 있다.

L밴드 HH편파 GMF 알고리즘은 PALSAR 후방산란계수 관측 자료와 산란계 ASCAT 해상풍, ECMWF 재분석자료, NDBC(National Data Buoy Center) 부이관측자료를 기반으로 개발된 경험모델로서, 후방산란계수와 바람벡터 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_0 = A_0(v, \theta)(1 + A_1(v, \theta) \cos\phi + A_2(v, \theta) \cos 2\phi) \quad (1)$$

$$A_0 = 10^{(a_0 + a_1 W + a_2 W^2 + a_3 W^3)/10} \quad (2)$$

$$A_1 = c_{13} + c_{14}x + c_{15}x^2 + (c_{16} + c_{17}x + c_{18}x^2)v \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{b_0 + b_1v + b_2v^2}{1 + \exp(b_3 + b_4v)} \quad (4)$$

여기서 σ_0 는 후방산란계수, ϕ 는 레이더 관측 방향에 대한 상대풍향, v 는 풍속, θ 는 입사각을 나타낸다. x 와 W

Fig. 3. Flow chart for sea surface wind retrieval from L-band ALOS/PALSAR data.

는 각각 $x = (\theta - 30)/15$, $W = 10 \log_{10} v$ 로 정의하며, a_n 와 b_n 은 입사각에 대한 함수값을 의미한다. 2006년 3월부터 2007년 7월까지의 PALSAR 자료를 활용한 2007년 L밴드 HH편파 GMF 알고리즘(이하 L밴드 GMF 2007)의 경우 b_n 을 입사각에 대한 1차 선형함수 형태로 나타낸 반면, 2007년 3월부터 2008년 5월까지의 자료를 기반으로 한 2009년 L밴드 HH편파 GMF 알고리즘(이하 L밴드 GMF 2009)은 이를 2차 함수로 표현하여 입사각에 대한 추가적인 보정 작업이 반영되었다. 본 연구에서는 두 알고리즘들을 모두 적용하고 그 산출 결과 및 오차 특성을 비교하였다.

Fig. 3은 L밴드 SAR 해상풍 산출 과정을 나타낸 흐름도이다. L밴드 HH 편파 GMF 알고리즘 적용을 위해서는 먼저 SAR 영상으로부터 후방산란계수와 입사각에 관한 정보를 산출해야 한다. 본 연구에서 다음과 같은 ALOS PALSAR 영상의 후방산란계수 변환식을 사용하였다.

$$\sigma_0 = 10 \log_{10} \langle DN^2 \rangle + CF \quad (5)$$

여기서 DN 은 픽셀의 측정된 디지털 숫자(Digital Number)이며, $\langle \rangle$ 은 앙상블 평균(ensemble averaging)을 나타낸다. CF 는 보정계수(Calibration Factor)로서 본 PALSAR 자료의 경우 -83 dB의 값을

가진다. 또한 SAR 해상풍 산출 알고리즘 적용을 위해서는 후방산란계수와 입사각 외에 풍향정보가 필요하며, ECMWF의 해상풍 재분석자료를 내삽하여 사용하였다.

3) 10 m 해상풍 환산 방법

산출된 L밴드 해상풍의 정확도를 제시하기 위하여 인공위성 산란계 QuikSCAT, ASCAT 자료와 기상청 해양기상부이 바람 관측 자료를 활용하였다. 인공위성 산란계를 이용한 해상풍은 모두 10 m 높이에서의 해상풍으로 환산하여 제공하고 있기 때문에 기상청 부이 자료 또한 같은 높이로 변환하여 사용할 필요가 있다. Fig. 1(a)에 동해안과 울릉도 사이에 표시한 기상청 해양기상 부이는 해수면으로부터 6 m 높이에서의 바람장을 관측하고 있으므로 모델 자료와 산란계 해상풍과 비교하기 위하여 10 m 높이의 풍속으로 변환하였다. 사용한 모델은 해양-대기 경계층 역학을 잘 표현하고 있는 것으로 평가된 Liu-Katsaros-Businger(LKB) 모델 방법을 활용하였다(Liu *et al.*, 1979; Liu and Tang, 1996).

LKB 모델은 풍속, 기온, 습도의 관측 높이와 실측값, 그리고 해수면온도 자료를 이용하여 관측된 풍속을 10 m 높이의 바람으로 변환할 수 있도록 설계되어 있다. LKB 모델에 사용되는 관계식은 다음과 같다(Liu *et al.*, 1979).

$$(U - U_s)/U^* = [\ln(z/z_0) - \psi_u]/k \quad (6)$$

여기서 U , U_s , U^* 는 각각 구하고자하는 10 m 높이에서의 풍속, 해수면에서의 풍속, 해수면에서의 마찰속도(friction velocity)이다. z 와 z_0 는 각각 구하고자하는 풍속의 높이와 관측높이를 나타내며, k 는 Von Karman 상수로 Paulson(1970)이 제시한 0.4를 사용하였다. 해수면에서의 마찰속도 U^* 는 바람의 응력(wind stress) τ 와 아래의 관계식을 가진다.

$$U^* = (\tau/\rho)^{1/2} \quad (7)$$

여기서 ρ 는 대기의 밀도이다. 해양-대기 경계층의 성층의 정도를 나타내는 ψ_u 는 Businger-Dyer 모델을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi_u = 2\ln[(X+1)/2] + \ln[(X^2+1)/2] - 2\tan^{-1}(X) + \pi/2 \quad (8)$$

$$X = (1 + a_u \xi)^{1/4} \quad (9)$$

(8)에서 X 를 구할 때 사용되는 계수 a_u 의 값으로 Liu and Tang(1996)이 제시한 10을 사용하였으며, ξ 는 다

음과 같이 구하고자하는 높이(z)와 모닌-오부코프 길이(Monin-Obukhov length, L)의 비로 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\xi = z/L \quad (10)$$

모닌-오부코프 길이는 다음과 같이 온위(potential temperature, T)와 비습(specific humidity, Q)의 관계식을 이용하여 구하였다.

$$L = (T_v U^*)^2 / (g k T_v^*) \quad (11)$$

$$T_v = T(1 + 0.61 Q) \quad (12)$$

$$T_v^* = T^* (1 - 0.61 Q + 0.61 Q^*) \quad (13)$$

T^* 와 Q^* 는 다음과 같은 열속(heat flux, H)과 수분속(moisture flux, E), 마찰속도와 관계식을 이용하여 산출하였다.

$$T^* = -H/(c_p U^*) \quad (14)$$

$$Q^* = -E/(\rho U^*) \quad (15)$$

4. 해상풍 산출 및 오차 특성

1) L밴드 SAR 해상풍 산출

Fig. 4는 L밴드 HH GMF 2009 알고리즘을 적용하여 2007년 8월 11일 우리나라 동해 연안을 관측한 ALOS PALSAR 영상으로부터 산출한 해상풍 풍속 결과이다. 전체 영역에 대해 공간 평균한 풍속 평균은

Fig. 4. Distribution of wind speed(m/s) from ALOS PALSAR data off the east coast of Korea at 02h 05m on 11 August 2007 by using L-band HH GMF algorithm.

6.01 m/s, 공간 표준편차는 2.62 m/s로 전반적으로 10 m/s 이하의 풍속을 나타내었다. 원산 부근의 연안에서 17 m/s 정도의 상대적으로 큰 풍속을 제외하면 전체적으로 서쪽에서 2~3 m/s 동쪽으로 갈수록 13 m/s로 풍속이 증가되는 양상을 보였다. 이러한 풍속의 분포는 태풍 파복이 지나간 이후 해상을 관측하였으므로 당시의 기상 상태와 유사하게 외해로 갈수록 상대적으로 풍속이 강한 분포를 보인 것으로 유추된다(Park and Kim, 2010). 인공위성 산란계가 관측하지 못하는 연안 영역에서도 풍속이 관측되었고 또 연안을 따른 풍속의 공간적인 구조도 재현되었다.

산출된 풍속의 정확도를 분석하기 위해 기상청 해양기상부가 관측 자료와 비교하였다. 우리나라 주변 해역 부이 관측망 부족으로 인해 연구영역 및 관측시점에 해당하는 실측자료가 매우 제한적이었으며 본 연구에서는 기상청 동해 해양기상부(130.00°E, 37.54°N) 1개 지점 실측자료를 사용하였다. 동해 실측부이와 비교지점과의 거리 차는 6 km, 시간차는 7분 이내였으며, SAR 산출 풍속과 부이관측 풍속은 각각 6.79 m/s(SAR), 6.12 m/s(부이)로 0.67 m/s의 작은 차이를 보였다. 이는 SAR를 통해 해상풍의 풍속을 높은 정확도로 산출할 수 있다는 사실을 뒷받침해준다.

서로 다른 알고리즘을 이용하여 산출된 해상풍의 특성을 분석하기 위하여 동일 영상(2007년 8월 11일)에 대해 L밴드 GMF 2007 알고리즘을 적용하여 얻은 결과와 앞서 계산한 L밴드 GMF 2009 산출 결과를 비교하였

다. Fig. 5(a)는 L밴드 GMF 2007 알고리즘을 적용하여 산출된 풍속 분포를 나타내며, Fig. 5(b)는 L밴드 GMF 2009 산출 결과와의 풍속차($V_{2009}-V_{2007}$)를 나타낸다. Fig. 5(a) 영상에서 동쪽 가장자리 부분은 입사각이 낮은 영역에 해당한다. L밴드 GMF 2007 해상풍 산출 결과의 경우 저입사각 영역에서 15 m/s 이상의 매우 강한 바람영역이 집중적으로 나타나는 반면, 고입사각 영역인 연안 부근에서는 5 m/s 이하의 낮은 풍속이 나타나는 등, 입사각에 따른 풍속 변동 특성이 뚜렷하게 나타났다.

이러한 강한 풍속은 태풍이 통과하는 시점과 맞물려 나타난 실제 해상풍일 수도 있고 풍속을 산출하는 과정에서 발생한 오차일 수도 있다. 입사각 효과인지 아닌지를 판단하기 위하여 L밴드 GMF 2009 산출 해상풍과의 풍속 차이를 산출하여 조사한 결과, 영상의 왼쪽에서 중앙 영역의 매우 낮은 입사각을 제외한 해역에서는 평균적으로 ± 0.5 m/s 이내의 차이가 나타났으나 동쪽 가장자리의 입사각이 낮은 곳($<21^\circ$)에서는 5 m/s 이상의 큰 산출풍속차를 보였다. 이는 GMF 2009 알고리즘은 L밴드 GMF 2007 버전 이후 입사각에 대한 보정이 추가되었을 가능성을 제시한다. 실제로 알고리즘에 의한 산출 풍속을 기상청 동해 해양기상부 실측자료와 비교분석한 결과, L밴드 GMF 2007 풍속이 부이 관측에 비해 평균 12.04 m/s의 큰 풍속차를 보였다. 따라서 동쪽의 강한 풍속은 태풍의 영향도 있지만 알고리즘 상에서 발생한 오차에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 5. Distribution of wind speed(m/s) off the coastal East Sea from ALOS PALSAR data(02h 05m on 11 August 2007) by using L-band HH GMF 2007 and (b) difference of wind speeds(m/s) between L-band HH GMF 2009 and 2007($V_{2009}-V_{2007}$).

Fig. 6. Distribution of wind speed(colored image) and direction(arrow) off the east coast of Korea from (a) ALOS PALSAR, (b) QuikSCAT and (c) ASCAT, where the red box indicates the boundary of ALOS PALSAR observation.

2) 해상풍의 정확도

Fig. 6은 각각 L밴드 SAR 영상과 QuikSCAT, ASCAT 관측자료로부터 산출한 해상풍 벡터 분포이다. QuikSCAT 산란계 해상풍과 비교해 볼 때 전체적으로 QuikSCAT 바람장이 높게 산출된 경향이 있으나, 바람 방향의 변화를 보았을 때 전체적으로 남쪽에서 남풍이 불어오면서 북쪽으로 감에 따라 남서풍으로 변화가 일어나고 있다. 또한 두 바람장은 38°N 이북 연안의 낮은 바람 영역과 외해로 갈수록 바람이 세지는 등 공간 구조에 있어서 유사한 경향을 보였다.

Table 1은 SAR 산출해상풍과 산란계 해상풍과의 일치점 자료에서의 정확도를 비교 분석한 결과이다. L밴드 GMF 2009 알고리즘으로 산출된 SAR 해상풍과 QuikSCAT 해상풍의 풍속 및 풍향 평균오차는 각각 2.16 m/s, 19.24°였으며, 관측당시 운용 초기 시점이었던 ASCAT 해상풍 일치점 자료와 비교했을 때의 풍속 및 풍향 평균오차는 각각 3.62 m/s, 28.02°로 QuikSCAT에 비해 다소 큰 풍속 및 풍향오차를 보였다. L밴드 GMF 2007 산출 해상풍의 경우 산란계 해상풍과의 평균 풍속차는 각각 4.10 m/s(QuikSCAT), 5.44 m/s(ASCAT)로 나타나서, L밴드 GMF 2009 산출 해상풍에 비해 상대적으로 다소 큰 오차를 가지는 것으로 나타났다. 특히 산출풍속의 공간분포로 보았을 때 두 산출 해상풍의 풍속차는 중간 바람 범위에서는 비교적 작은 차를 가지나 10 m/s 이상의 강한 풍속 범위에서는 풍속차가 커지는 경향을 뚜렷하게 보였다.

그 동안 보고되었던 인공위성 산란계 자료를 이용한 해상풍의 정확도 검증 연구 결과들을 살펴보면 위성 발사 당시 기대했던 2 m/s 이하의 정확도를 대부분 만족

Table 1. RMS errors between ALOS/PALSAR winds and wind vectors from scatterometers(QuikSCAT and ASCAT)

Algorithm		QuikSCAT	ASCAT
Wind speed (m/s)	GMF 2007	4.10	5.44
	GMF 2009	2.16	3.62
Wind direction(deg)		19.24	28.02

하고 있다. Bentamy *et al.*(2008)는 2007년 3월부터 10월까지 ASCAT 해상풍 자료를 미국 연안의 NDBC 부이 관측자료, 적도 태평양의 TAO(Tropical Atmosphere Ocean) 자료 등과 비교한 결과 모든 풍속 범위에 대하여 평균제곱근오차는 각각 1.72 m/s, 0.79 m/s, 1.54 m/s임을 보고하였다. 또한 2006년 7월부터 2008년 6월까지 QuikSCAT 풍속자료와 지중해에 위치한 부이 관측자료를 비교한 결과, 1.97 m/s의 평균제곱근오차가 보고되었다(Pensieri *et al.*, 2010). Ebuchi (2001)도 1999년 7월부터 2000년 12월까지의 NDBC 부이관측 자료, TAO, JMA(Japan Meteorological Agency) 부이관측 자료와 비교한 결과 1.02 m/s의 오차를 가진다고 보고하였다.

그러나 산란계 자료는 약한 풍속일 때 오차가 큰 단점이 있고(Satheesan *et al.*, 2007), 연안 가까운 해역이 외해보다 상대적으로 큰 오차를 보이는 경향이 있다(Pickett *et al.*, 2003). 따라서 PALSAR 해상풍 자료 검증에 활용한 산란계 바람장도 해양과 대기의 상태에 따라서 여러 가지 오차를 유발할 수 있으므로 SAR 자료를 보다 정확히 평가하기 위해서 가능한 많은 해양 실측 바람장 자료가 필요하다.

3) 풍향과 풍속 오차와의 관련성

풍향은 SAR영상을 활용한 해상풍 산출에 있어 중요

한 기초입력변수로서 한반도 주변 해역과 같이 바람장 변동성이 큰 해양환경에서는 풍향 오차로 인한 산출풍속오차가 상대적으로 더 크게 나타날 수 있다. Fig. 7은 L밴드 GMF 2009 알고리즘으로 산출한 후방산란계수에 대한 상대풍향에 따른 풍속을 도시한 것이다. 동일 후방산란계수값을 가질 때 풍향의 변화에 대한 풍속값은 180° 를 기준으로 서로 대칭적으로 나타났으며 후방산란계수값에 따라 상대풍향에 따른 풍속 변화폭도 다르게 나타났다. 상대풍향 변화에 따른 최대풍속오차를 조사해본 결과 후방산란계수 σ_0 가 -14 dB일 경우 5.94 m/s이며, σ_0 가 커질수록 증가하여 -11 dB의 경우 9.38

Fig. 7. Wind speeds(m/s) as a function of wind direction inputs for L-band GMF wind model, where the lines are backscattering coefficient values of -11 dB, -12 dB, -13 dB, and -14 dB from the top to the bottom, respectively.

m/s에 달하였다. 연구 영역의 후방산란계수 평균값인 -13.6 dB를 기준으로 할 경우, 최대풍향오차인 30° 를 반영하면 2.25 m/s의 평균풍속오차가 발생할 수 있으며 이는 평균풍속 대비 17%에 해당하였다.

기존 C밴드 SAR를 활용한 해상풍 산출의 경우, 이러한 풍향오차로 인한 풍속오차가 최대 30-40%에 달한다고 보고된 바 있으며(Kim *et al.*, 2010), 실제 ERS-1 자료를 활용한 해상풍 정확도 분석 결과, 실측 자료와의 풍향오차 19° 로 인한 풍속오차가 1.2 m/s에 달하는 결과도 보고되었다(Wackerman *et al.*, 1996). Radarsat-1 활용 해상풍 산출 연구의 경우, 30° 의 풍향오차로 인해 2.4 m/s의 풍속오차가 나타나는 등 본 연구결과와 유사한 결과를 보였으며(Vachon and Dobson, 2000), Takeyama *et al.*(2010) 또한 ENVISAT ASAR 산출 해상풍과 실측자료, 모델자료, 산란계 자료과의 종합적인 비교를 통해 본 연구 결과와 유사한 17-26%의 풍속 오차가 발생하였음을 보고한 바 있다. 즉, Fig. 7은 해상풍의 정확한 풍속을 산출하기 위해서는 보다 정확한 풍향이 입력되어야 함을 강조하고 있다.

4) 입사각에 풍속 오차 특성

입사각에 의한 산출풍속 오차 특성 파악을 위하여 각 알고리즘별 산출풍속을 비교분석하였다. Fig. 8은 입사각에 대한 L밴드 GMF 2007 알고리즘과 L밴드 GMF 2009를 이용하여 산출한 SAR 해상풍과 산란계 해상풍의 풍속차를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같

Fig. 8. Difference of wind speeds(m/s), PALSAR minus scatterometer, estimated from (a) L-band HH GMF 2007 and (b) L-band HH GMF 2009 as a function of incidence angle, where the rectangle symbols correspond to average values of the differences within 1° bin of incidence angles and the error bars represent mean errors of each bin.

이 2007 모델로 산출된 PALSAR 해상풍은 산란계 해상풍에 비해 20° 이하의 낮은 입사각에서는 과대평가되고 있고, 반면에 25° 이상의 높은 입사각에서는 낮게 계산되는 경향이 있었다.

이러한 오차특성은 C밴드 광역모드 SAR 영상을 활용한 산출 해상풍에서도 나타나며, 관측기기의 한계와 부정확한 보정 작업으로 인해 25° 이하 저입사각영역과 39° 이상 고입사각영역에서 큰 풍속오차들이 나타난다고 보고된 바 있다(Horstmann *et al.*, 2002). L밴드 GMF 2009에서는 L밴드 GMF 2007과 달리 후방산란 계수와 입사각 간의 선형관계 가정으로 인한 산출풍속 오차를 줄이기 위해 2차 함수 형태의 보정항을 도입하였다.

L밴드 GMF 2009 산출풍속 결과의 경우도 전자와 마찬가지로 입사각에 따른 과대-과소예측 경향이 여전히 다소 존재하나 풍속오차 폭이 ± 2 m/s 이내로 크게 줄어들었음을 알 수 있다. 특히 20° 이하 저입사각 영역에서의 과대예측 풍속오차는 평균 풍속차 6.80 m/s(L밴드 GMF 2007)에서 1.14 m/s(L밴드 GMF 2009)로 크게 개선된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 SAR 해상풍 모델을 만들 때 가능한 많은 해양 자료를 수집하고 분석하여야 하고, 오차를 유발할 수 있는 요인들을 모두 고려하여 이를 해상풍 모델에 반영하여야 함을 제시한다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 L밴드 SAR 영상을 활용하여 한반도 주변 해역의 해상풍을 산출하고 요인별 오차특성에 대해 분석하였다. L밴드 산출 해상풍은 기존 인공위성 산란계 해상풍이 원천적으로 관측할 수 없었던 연안지역의 바람장 분포를 포함한 고해상도 해상풍 산출 능력을 보여주었으며 해상부이 실측자료 비교 결과 상대적으로 높은 정확도를 보였다. 그러나 산란계 자료를 기반으로 한 각 요인별 풍속 오차 정밀 분석 결과에서 나타난 바와 같이 광역의 고해상도 해상풍 산출을 위해서는 몇 가지 중요한 풍속오차 요인들에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

먼저 L밴드 SAR 산출 풍속은 알고리즘 특성상 외부 입력변수인 풍향의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

특히 이러한 풍향에 의한 풍속오차는 풍속의 범위에 따라 달라지며 풍속이 클수록 그 오차가 더 커지는 경향성이 발견되었다. 따라서 L밴드 SAR 해상풍의 풍속 정확도를 향상시키기 위해서는 정확한 풍향 정보 입력이 중요하며 강한 바람장이 존재하거나 풍향 변화가 큰 해역에서의 산출 해상풍의 경우 L밴드 산출 해상풍 분포 특성 해석에 있어 이러한 오차 원인을 추가적으로 함께 고려해야만 한다.

또한 L밴드 해상풍 산출 알고리즘의 경우 입사각에 의한 산출 풍속 편차 특성을 보인다. 특히 L밴드 GMF 2007 알고리즘의 경우 이러한 편차 특성이 더욱 강하게 나타나는데 이는 산란계 일치점 자료 특유의 중간바람 외 영역의 과대-과소예측 경향으로 인한 오차 특성(Freilich and Dunbar, 1999; Ebuchi, 2000)과 동시에 단순 1차 선형함수로 가정한 L밴드 GMF 2007 알고리즘의 입사각 보정항으로 인해서 발생한 문제로 판단된다. 따라서 모델 함수를 개발할 때 저입사각에서 고입사각까지 다양한 범위의 입사각 조건이 포함된 광역의 해상풍의 일치점 자료가 필요할 것이다. 또한 PALSAR 광역 자료를 활용할 때에는 L밴드 GMF 2007 알고리즘보다 2009 L밴드 GMF 알고리즘을 우선적으로 적용함으로써 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 이러한 저입사각에서의 양의 편차, 고입사각에서의 음의 편차 특성은 추가 입사각 보정항이 반영된 L밴드 GMF 2009 알고리즘에서도 여전히 나타나므로 보다 정확한 해상풍을 산출하고 해양, 기상 등 다방면으로 활용하기 위해서는 전구 해양을 대상으로 해양 실측치와의 일치점 데이터베이스를 구축하고 활용하여야 할 것이다. 이러한 일치점 자료들을 바탕으로 L밴드 SAR 해상풍 산출 오차에 대한 보다 정밀한 요인 분석과 오차를 줄일 수 있는 추가 연구가 이루어져야 할 것이다.

사 사

이 연구는 국가기상위성센터의 위성자료의 예보 및 응용기술개발을 위한 기술개발과제 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 연구에 활용된 ALOS PALSAR 자료는 JAXA의 ALOS 연구지원 프로그램과 EAST-1 프로그램 협력을 통해 제공되었으며 자료 활용에 도움을 주

신 JAXA의 Isoguchi박사님께 감사드립니다. 또한 논문 심사과정에서 세심한 지적과 조언을 통해 논문이 개선되도록 도움을 주신 익명의 심사위원분들께도 깊은 감사를 전합니다.

참고문헌

- 강문경, 박용욱, 이문진, 이훈열, 2007. SAR를 이용한 해풍, 파랑, 해류 추출 기법 연구, 한국항해항만학회지, 31(1): 35-42.
- 김태립, 1999. 한국 주변 해역에서의 SAR 영상 응용예, 대한원격탐사학회지, 15(1): 61-71.
- 윤홍주, 박광순, 김상익, 2006. SAR자료를 이용한 해상풍 산출 및 현장 자료 간의 비교·검정, 한국해양정보통신학회지, 10(4): 706-711.
- 이문진, 김혜진, 이승현, 홍기용, 2007. SAR 위성영상 해수유동 정보추출 및 활용, 해양환경안전학회지, 13(4): 21-26.
- 황효정, 김현구, 2011. SAR 위성영상을 이용한 해상풍 분석, 한국풍공학회지, 15(4): 67-71.
- Bentamy, A., D. Croize-Fillon, and C. Perigaud, 2008. Characterization of ASCAT measurements based on buoy and QuikSCAT wind vector observations, *Ocean Science*, 4: 265-274.
- Ebuchi, N., 2000. Evaluation of NSCAT-2 wind vectors by using statistical distributions of wind speeds and directions, *Journal of Oceanography*, 56(2): 161-172.
- Ebuchi, N., 2001. Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IGARSS'01, 3: 1082-1085.
- Freilich, M.H. and R.S. Dunbar, 1999. The accuracy of the NSCAT-1 vector winds: comparisons with NDBC buoys, *Journal of Geophysical Research*, 104(C5): 11231-11246.
- Horstmann, J., W. Koch, and S. Lehner, 2002. High resolution wind fields retrieved from SAR in comparison to numerical models, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IGARSS'02, 3(3): 1877-1879.
- Isoguchi, O. and M. Shimada, 2007. An L-band model function for the ocean-normalized radar cross section derived from PALSAR, *Proc. of 1st Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program*, Kyoto, Nov. 19-23, Digitally available on CD.
- Isoguchi, O. and M. Shimada, 2009. An L-band ocean geophysical model function derived from PALSAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7): 1925-1936.
- Kang, M.K. and H. Lee, 2007. Estimation of ocean current velocity near Incheon using Radarsat-1 SAR and HF-radar data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 23(5): 421-430.
- Kim, D.J., 2009. Wind retrieval from X-band SAR image using numerical ocean scattering model, *Korean Journal of Remote Sensing*, 25(3): 243-253.
- Kim, D.J. and W.I. Moon, 2002. Estimation of sea surface wind vector using RADARSAT data, *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 55-64.
- Kim, D.J., W.I. Moon, D.A. Imel, and D. Moller, 2001. Remote sensing of ocean waves and currents in Ulsan area using AIRSAR Along-Track Interferometry(ATI), *International Symposium on Remote Sensing*, 17(1): 657-662.
- Kim, T.S. and K.A. Park, 2011. Estimation of polarization ratio for sea surface wind retrieval from SIR-C SAR Data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 27(6): 729-740.
- Kim, T.S., K.A. Park, and W.I. Moon, 2010. Wind vector retrieval from SIR-C SAR data off the east coast of Korea, *Journal of Korean Earth Science Society*, 31(5): 475-487.
- Liu, W.T. and W. Tang, 1996. Equivalent neutral wind, JPL Publication 96-17, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, USA.

- Liu, W.T., K.B. Katsaros, and J.A. Businger, 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: 1722-1735.
- Park, K.A. and K.R. Kim, 2010. Unprecedented coastal upwelling in the East/Japan Sea and linkage to long-term large-scale variations, *Geophysical research letters*, 37:L09603, doi:10.1029/2009GL042231.
- Paulson, C.A., 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer, *Journal of Applied Meteorology*, 9: 857-861.
- Pensieri, S., R. Bozzano, and M.E. Schiano, 2010. Comparison between QuikSCAT and buoy wind data in the Ligurian Sea, *Journal of Marine Systems*, 81(4): 286-296.
- Pickett, M.H., W. Tang, L.K. Rosenfeld, and C.H. Wash, 2003. QuikSCAT satellite comparisons with nearshore buoy wind data off the U.S. west coast, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(12): 1869-1879.
- Satheesan, K., A. Sarkar, A. Parekh, M.R. Ramesh Kumar, and Y. Kuroda, 2007. Comparison of wind data from QuikSCAT and buoys in the Indian Ocean, *International Journal of Remote Sensing*, 28(10): 2375-2382.
- Takeyama, Y., T. Ohsawa, K. Kozai, C. Hasager, and M. Badger, 2010. Effect of wind direction on ENVISAT ASAR wind speed retrieval, *Proc. of Techno-Ocean Network 2010*, Kobe, Oct. 14-16, Digitally available on CD.
- Vachon, P.W. and F.W. Dobson, 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.
- Wackerman, C.C., C.L. Rufenach, R.A. Shuchman, J.A. Johannessen, and K.L. Davidson, 1996. Wind vector retrieval using ERS-1 synthetic aperture radar imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(6): 1343-1352.
- Won, J.S., H.S. Jeong, and T.R. Kim, 1998. Wind field estimation using ERS-1 SAR data: The initial report, *International Symposium on Remote Sensing*, 14: 286-291.