

SAR를 이용한 해풍, 파랑, 해류 추출 기법 연구

강문경* · 박용욱** · 이문진*** · †이훈열****

*, **, **** 강원대학교 지구물리학과, *** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Study on the Extraction of Ocean Wind, Wave and Current using SAR

Moon-Kyung Kang* · Yong-Wook Park** · Moon-Jin Lee*** · †Hoon-Yol Lee****

*, **, *** Dept. of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 192-1, Korea

**** Maritime and Ocean Engineering Research Institute, Daejeon 104, Korea

요 약 : 최근 인공위성 SAR를 이용한 기술은 해풍, 파랑, 해류 등과 같은 해양에서 발생하는 다양한 현상을 관측하고 연구하는데 필수적인 기술로 대두되고 있다. CMOD4, CMOD-IFR2 모델은 해상풍의 크기를 구할 수 있으며, wave-SAR 변환 기법과 inter-look cross-spectra 기법은 파랑의 크기, 방향과 같은 물리적 값을 추출할 수 있다. 또한 Doppler shift 기법을 적용하여 해류속도를 구할 수 있다. 본 연구에서는 위의 기법들을 종합적으로 적용하여 SOP (SAR Ocean Processor) 프로세서를 개발하였다. 이 프로세서를 한반도 연안 지역에 적용하여 RADARSAT-1 영상자료로부터 해풍, 파랑, 해류의 물리적 정보를 추출하였으며, 이를 현장 관련 자료와 비교하여 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 해풍, 파랑, 해류, CMOD4, COMD_IFR2, wave-SAR 변환, inter-look cross-spectra, Doppler shift

Abstract : Recently satellite SAR techniques have become essential observation tools for various ocean phenomena such as wind, wave, and current. The CMOD4 and CMOD-IFR2 models are used to calculate the magnitude of wind at SAR resolution with no directional information. Combination of the wave-SAR spectrum analysis and the inter-look cross-spectra techniques provides amplitude and direction of the ocean wave over a square-km sized imagerie. The Doppler shift measurement of SAR image yields surface speed of the ocean current along the radar looking direction, again at imagerie resolution. In this paper we report the development of a SAR Ocean processor (SOP) incorporating all of these techniques. We have applied the SOP to several RADARSAT-1 images of the coast of Korean peninsula and compared the results with oceanographic data, which showed reliability of spaceborne SAR-based oceanographic research.

Key words : Ocean wind, Ocean wave, Ocean current, CMOD4, CMOD-IFR2, Wave-SAR transform, Inter-look cross-spectra, Doppler shift

1. 서 론

최근 인공위성 원격탐사(satellite remote sensing)는 해양학 분야에서 경제적이고 필수적인 도구로 부각되고 있다. 해양과 관련된 원격탐사 활용분야에서는 대기나 기상 상태에 따른 제약점이 없고, 낮/밤에 무관하게 수시로 변화하는 해상의 상태를 고해상도의 영상 정보로 제공하는 SAR나 scatterometer 시스템의 사용이 필수적이라 할 수 있다(Curlander and McDonough, 1991).

합성구경레이더(synthetic aperture radar, SAR)는 영상레이더(imaging radar)의 일종으로서, 해양에서 중력이 주요 복원력이 되는 중력파(gravity wave)나 표면장력파(capillary wave) 등 파랑의 분포상태를 2차원적인 영상으로 관측할 수

있는 원격탐사 시스템이다. 해상에 나타나는 표면파(surface waves), 내부파(internal waves), 해류(currents), 바람(wind cells), 해저 지형에 따른 특성(bathymetric features), 선박 항적(ship wakes), 기름 유출(oil spills) 등과 같은 해양학적 현상들은 후방산란계수(backscattering coefficient)나 공간적 스펙트럼 분포(spectral distribution)에 따라 2차원의 SAR 영상자료로 가시화된다(Elachi, 1988; Mouchot and Garello, 1998).

본 연구는 해양의 해풍(wind), 파랑(wave), 해류(current)와 같은 다양한 해양 현상에 대하여 인공위성 SAR 영상으로부터 풍속의 크기와 방향, 해파의 파장과 진행방향, 유속의 크기와 방향과 같은 해양물리학적 정보를 추출할 수 있는 종합적인 프로세서의 개발을 목표로 하였다.

이 연구에서는 해상풍의 정보를 추출하기 위해 CMOD4

* 대표저자 : 강문경(정회원), heidiyaa@paran.com (033)250-8587

** heidiyaa@paran.com (033)250-8587

*** heidiyaa@paran.com (033)250-8587

† 교신저자 : 이훈열, hoonyol@kangwon.ac.kr (033)250-8587

(Stoffelen and Anderson, 1997a; 1997b)와 CMOD-IFR2 (IFREMER-CERSAT, 1999) 경험모델과 편광 비(polarization ratio)를 이용한 비례식(Horstmann et al., 2000)을 적용하여 SAR 영상의 후방산란계수로부터 풍속을 구하였다. 또한 wave-SAR 변환 방법을 통해 파랑의 스펙트럼을 추출하고 파장과 파의 진행방향을 산출하였으며, 이 때 발생하는 파랑 방향에 대한 180° 모호성(180° ambiguity)의 문제를 해결하기 위하여 inter-look cross-spectra 기법(Engen and Johnsen, 1995; Bao and Alpers, 1998; Dowd et al., 2001)을 적용하였다. 해류의 속도 정보는 단위 산란체에 대하여 SAR 영상이 얻어지는 시간 동안에 해상의 산란체가 움직이면서 발생하는 Doppler shift를 이용한 기법(Chapron et al., 2005)으로 산출하였다.

이와 같이 SAR 영상으로부터 산출된 해풍, 파랑, 해류의 해양학적 파라미터를 기상자료나 해양자료 등과 같은 현장 관련 자료와 비교하여 추출된 결과를 검토하였다.

2. 이론적 배경

1978년 미국의 SEASAT 위성이 발사된 이후 SAR를 이용한 해양 부분의 초기 연구는 해양과 관측 센서간의 기하학적 관계 등 기본원리에 관한 연구(Elachi and Brown, 1977; Tomiyasu, 1978; Jain, 1981; Ivanov, 1982; Moore, 1985) 내용이 주를 이루었으며, 이후 해양의 역학적 움직임과 현상을 이해하고 파악하기 위한 현상학적 해양 파라미터의 추정 및 검증을 위한 연구(Alpers and Rufenach, 1979; Alpers et al., 1981; Brüning et al., 1991)들이 시도되었다. 또한 선형적 거동을 보이는 파의 움직임뿐 아니라 준선형적(quasi-linear) 및 비선형적(nonlinear) 거동 특성을 보이는 파에 관한 연구(Swift and Wilson, 1979; Raney, 1980; Raney, 1981)들이 이루어져 왔다. Hasselmann and Hasselmann (1991)은 역산방법을 이용한 비선형파의 맵핑에 관한 연구에서 파의 진행방향 및 스펙트럼 특성을 분석하여 이후 다른 연구들에 도움을 주었다. 최근에는 선박, 구조물, 기상재해 등 해양활동과 관련된 다양한 활용 기술적 응용과 알고리즘의 수정보완 및 개발(Engen and Johnsen, 1995; Bao and Alpers, 1998; Dowd et al., 2001; Chapron et al., 2005)에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 또한 interferometry 기술이나 polarimetry 기술을 적용한 응용 연구들과 dual-beam ATI (along-track interferometry)와 같은 새로운 시스템 개발과 관련된 연구(Frasier and Camps, 2001; Farquharson et al., 2004; Toporkov et al., 2005)들이 시도되고 있다.

최근 국내에서 발표된 해양관련 연구들을 살펴보면, 양(2006)은 SAR를 이용한 선박의 안전운항에 중요한 요소인 파랑 방향스펙트럼 추정에 관한 연구에서 SAR 영상자료를 활용하여 파랑을 계측하고 추정하는 기법을 시도하였다. 김(2001; 2005)은 ERS와 RADARSAT 영상자료로부터 경험모델을 이용하여 해상풍의 방향벡터추출 등 기존의 경험모델의 적용 및 수정에 관한 연구, 파랑, 해류, 내부파에 적용 가능성과 알고리

즘의 수정보완을 위한 연구, 그리고 해양표면에 존재하는 파랑에 대한 준선형(quasi-linear) 변환을 연구하였다.

Table 1은 본 연구에 적용된 해풍, 파랑, 해류별 각각의 연구기법과 추출 가능한 해양특성의 물리량과 한계점을 정리한 표이다. 측정 대상이 해풍인 경우 CMOD4와 CMOD-IFR2 모델은 10~20 m의 영상 해상도 내의 풍속 정보를 얻을 수 있으나 방향에 대한 정보는 현장자료나 관련 자료를 참조하여 해결해야 하는 한계점이 있다. 앞서 언급한 바와 같이 파랑 정보 추출 기법 중 wave-SAR 변환 기법은 방향에 대한 180° 모호성을 해결하지 못하는 한계가 있으며, 반면 inter-look cross-spectra 기법으로 이를 해결할 수 있다. 해류와 같이 해상 표면의 움직임에 대한 이동속도를 구하기 위한 방법으로 Doppler shift 기법이 응용되고 있는데 이는 LOS (line of sight) 방향에 대한 정보만을 얻을 수 있는 한계가 있다. Dual-beam ATI의 경우는 이러한 한계점을 해결할 수 있는 방법이나 최근 개발되고 있는 새로운 SAR 시스템을 필요로 한다.

본 연구에서는 SAR 영상에서 해풍, 파랑, 해류의 특성과 관련된 물리량을 종합적으로 추출하기 위해 이와 관련된 연구 기법들을 적용하였으며, 주요 내용들은 다음과 같다.

Table 1 Methods on satellite oceanography using SAR

Target	Wind	Wave		Surface Velocity	
Methods	Wind Retrieval Models	Wave-SAR Transform	Inter-Look Cross-Spectra	Doppler Shift	Dual-Beam ATI
Values					
Magnitude	○	○	○	△ LOS only	○
Direction	×	△ 180° ambiguity	○	△ LOS only	○
Spatial Resolution	10 m SAR Resolution	2 km SAR imagette	2 km SAR imagette	2 km SAR imagette	10 m SAR Resolution
Limitation	A priori wind direction required	Azimuth cutoff, strongly nonlinear		wind-current decomposition	New system

1) 해풍(wind): CMOD4, CMOD-IFR2

일반적으로 해상풍의 정보를 추출하는 알고리즘으로 사용되는 CMOD4 경험식에서 후방산란계수 σ^0 와 해상풍의 속도 V 의 관계식은 다음 식 (1)과 같다. 이때 ϕ 는 풍향(relative wind direction), b_r 은 잔차보정인수(residual correction factor)이며, $\alpha, \beta, \gamma, b_1, b_2, b_3$ 는 18개의 관련 계수로 전개되는 다항식으로 표현된다(Stoffelen and Anderson, 1997a; 1997b). 이 논문에서는 관련 다항식과 계수들의 기술을 생략하였다.

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

여기서, $b_0 = b_r \times 10^{\alpha + \gamma f_1(V + \beta)}$ 이며,

$$f_1(y) = \begin{cases} -10 & \text{if } y \leq 10^{-10} \\ \log y & \text{if } 10^{-10} < y \leq 5 \text{ 이다.} \\ \sqrt{y}/3.2 & \text{if } y > 5 \end{cases}$$

CMOD-IFR2 경험모델은 SAR 영상에서 해상풍을 추출하는 또 다른 경험식으로 아래 식 (2)와 같다.

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

여기서, V , ϕ 은 위에서 기술한 바와 같이 속도, 풍향을 나타내며, α , β , b_1 , b_2 는 관련 파라미터 값으로 구성된 다항식 모델 기술(IFREMER-CERSAT, 1999)되는데 관련 다항식과 파라미터 값들은 생각하였다. CMOD4와 CMOD-IFR2 경험식에 적용되는 관련 매개변수는 각각 다른 값을 가진다.

식 (1)과 식 (2)는 C-밴드(4~8 GHz) VV 편광인 경우에만 적용 가능한 경험식이므로, 본 연구에서 사용된 RADARSAT-1과 같이 HH 편광 모드로 취득된 SAR 영상자료의 경우는 식 (3)과 식 (4)와 같이 편광 비(polarization ratio)에 대한 비례식을 적용하게 된다(Horstmann et al., 2000).

$$\sigma_0^{HH} = \frac{(1 + \alpha \tan^2 \theta)^2}{(1 + 2 \tan^2 \theta)^2} \sigma_0^{VV}(u, \phi, \theta) \quad (3)$$

$$\sigma_0^{HH} = \frac{(1 + 2 \sin^2 \theta)^2}{(1 + 2 \tan^2 \theta)^2} \sigma_0^{VV}(u, \phi, \theta) \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서 u 는 풍속(wind speed), ϕ 는 풍향(wind direction), θ 는 입사각(incidence angle)이다. 식 (3)에서 α 값에 따라 Bragg ($\alpha = 0$), Krichhoff ($\alpha = 1$), Unal ($\alpha = 0.6$) 산란 모델로 구분되며, Elfouhaily 산란 모델은 식 (4)로부터 산출된다. 실제 SAR 영상에 적용할 때에는 해양의 상태에 따라 적절한 경험식과 편광 비례식을 선택하여 사용하게 되며, 이 때 현장 관측 자료와의 상호 비교 및 검증이 필요하다.

2) 파랑(wave): wave-SAR 변환, inter-look cross-spectra 기법

해상에서 발생하는 파의 특성들 중 선형적인 파랑 정보를 추출하기 위한 일반적인 신호 처리 과정은 SAR 영상을 2차원적 푸리에 변환(Fourier transform)을 실시한 후 적용된 결과에서 파랑의 주요 스펙트럼을 추출함으로써 대표적 파랑의 파장과 진행 방향을 결정하게 된다. 최근 준선형적 및 비선형적 거동특성(Hasselmann et al., 1996)을 보이는 파에 관한 연구 등이 적용되어지고 있다.

이 연구에서는 일반적인 선형파 해석에 적용된 FFT (fast Fourier transform) 기법을 적용하였으며, FFT 기법은 함수의 근사 값을 계산하는 알고리즘으로써 푸리에 변환에 근거하여 근사공식을 이용한 이산푸리에변환을 계산할 때 연산 횟수를 줄일 수 있도록 고안된 알고리즘이다.

일반적으로 일정한 파수벡터 \vec{k}_0 와 각주파수 $\vec{\omega}$, 진폭 A 를 가지는 파동은 공간 \vec{r} 과 시간 t 의 함수로 나타낼 수 있으며,

$$f(\vec{r}, t) = A e^{j(\vec{k}_0 \cdot \vec{r} - \omega_0 t)} \quad (5)$$

여기서 파랑은 2차원적인 파동이므로, 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{r} &= (x, y) = x\hat{x} + y\hat{y} \\ \vec{k}_0 &= (k_x, k_y) = k_x\hat{x} + k_y\hat{y} \end{aligned} \quad (6)$$

이러한 파랑은 인공위성이 지나가면서 시간 $t = t_0$ 에서 순간적으로 관측되므로, SAR 영상에서는 식 (7)과 같이 공간 \vec{r} 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$f(\vec{r}) = A e^{j(\vec{k}_0 \cdot \vec{r} - \omega_0 t_0)} \quad (7)$$

이렇게 얻어진 2차원 영상을 2D 푸리에 변환을 시키면, 이때 파수 \vec{k} 는 공간상에서 \vec{k}_0 에 해당하는 곳에서만 값을 가지고 다른 영역에서는 0의 값을 나타내는 2차원 delta 함수의 형태가 된다. 이때 함수의 절대 값을 취하면 다음과 같다.

$$|F(\vec{k})| = A \delta(\vec{k} - \vec{k}_0) \quad (8)$$

실제 영상에서는 real 값만이 존재하므로 다음 식과 같이 표현된다.

$$f(\vec{r}) = A \cos(\vec{k}_0 \cdot \vec{r} - \omega_0 t_0) \quad (9)$$

이를 푸리에 변환하고, 절대 값을 취하여 스펙트럼을 구하면,

$$|F(\vec{k})| = \frac{A}{2} \delta(\vec{k} - \vec{k}_0) + \frac{A}{2} \delta(\vec{k} + \vec{k}_0) \quad (10)$$

식 (10)과 같이 되며, \vec{k}_0 와 $-\vec{k}_0$ 위치에서만 값을 가지고, 나머지 영역에서는 값을 가지지 않게 되는데 이로 인해 파랑의 방향성에서 180° 모호성이 나타나게 된다. 이처럼 선형적으로 일정한 패턴을 보이는 파랑의 경우 real 영상자료를 2D 푸리에 변환하면 원점대칭 형태의 파랑 스펙트럼으로 나타나게 된다.

영상에서 볼 때 \vec{k}_0 는 k_x 와 k_y 성분으로 나뉠 수 있으며, 각각의 성분은 화소(pixel) 수와 한 화소 당 파수 값을 곱한 값으로 얻을 수 있다. \vec{k}_0 값은 2D FFT 결과로 도출된 원점대칭의 스펙트럼 영상에서 원점에서 중심 값까지의 벡터 값으로 해상에서의 파랑에 적용 시 진행하고 있는 파랑 혹은 너울의 파장 λ 값을 푸는 실마리를 제공한다. 산출된 k_x 와 k_y 값으로부터 파수는 다음 $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ 식으로 계산된다. 이렇게 계산된 k 값으로부터 아래 식 (11)을 적용하여 파랑의 파장을 구할 수 있게 된다.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (11)$$

이와 같이 wave-SAR 변환식으로 추출된 파랑의 방향은 180° 모호성(ambiguity)을 가지며, 이러한 모호성을 해결하기 위해 inter-look cross-spectra 연구기법을 적용하였다. 이 기법은 단일 지점에 대하여 SAR 영상을 얻을 때 약 0.5~1초 사이의 coherent integration time 동안 영상화가 이루어지는데, 이 시간 동안 파랑이 진행하면서 위치가 변하게 된다. 따라서 SAR 영상화 전처리 단계에서 coherent integration time을 나누어 서로 다른 시간에 얻어진 영상을 2개 이상 만들고, 이 영상간의 부정합 관계를 이용하여 파랑의 이동 방향을 추출해낸다. Cross-spectra 기법을 적용 시 파랑의 방향은 imaginary 스펙트럼 자료로부터 얻을 수 있다. 스펙트럼 결과는 대칭(symmetric) 형태를 보이는 real 스펙트럼 결과와 달리 imaginary 스펙트럼 결과는 비대칭(antisymmetric) 형태를 보이는데 imaginary 스펙트럼 결과에서 (+)쪽이나 (-)쪽으로 파랑의 진행방향이 결정된다. 본 연구에서는 (+)쪽이 파랑의 진행방향이다.

3) 해류(current): Doppler shift

SAR 영상이 얻어질 당시 산란체의 움직임은 도플러 변화(Doppler shift, f_D)로 기록된다. 해류의 이동속도(speed) U_D 와 f_D 와의 관계식은 아래와 같다(Chapron et al., 2005).

$$U_D = -f_D / k_e \sin \theta_I \quad (12)$$

U_D : 이동속도(target speed towards radar, m/s)

f_D : 도플러 변화(Doppler shift)

$$(f_D = \Delta f \times \Delta pixel, \Delta f = prf / imagtte\ size)$$

k_e : 파수(electromagnetic wavenumber, $2\pi/\lambda$)

θ_I : 입사각(angle of incidence of the radar beam)

f_D 는 Δf 와 이론적 센트로이드(nominal centroid)와 예측된 도플러 센트로이드(Doppler centroid) 간의 픽셀 차($\Delta pixel$)로부터 계산된다. 이때 Δf 는 prf (pulse repetition frequency) 값을 영상처리 시 일정한 영역에 해당하는 imagette 크기로 나눈 값이다. 해류 이동 속도의 부호는 산란체(해류)가 안테나 쪽을 향하여 움직이는 경우는 (+)값을, 멀어져가는 경우는 (-)값을 나타낸다. 일반적으로 f_D 는 SAR 영상화 전처리 단계(focusing)에서 시야(range) 방향으로 처리가 이루어진 후 방위(azimuth) 방향으로 1D 푸리에 변환한 상태에서 이루어진다. SAR SLC (single look complex) 영상이 입력 자료인 경우에는 방위 방향으로 1D 푸리에 변환된 상태에서 f_D 값이 산출된다.

3. SAR Ocean Processor(SOP)

SOP (SAR Ocean Processor)는 Fig. 1에 도시된 바와 같이

SLC SAR 영상자료를 이용하여 해풍, 파랑, 해류 정보 추출 알고리즘을 기반으로 일련의 해역 특성 정보를 추출하도록 개발되었다. 이 프로그램은 Windows 환경에서 Linux 환경을 모사하는 Cygwin이라는 프로그램에서 컴파일되고 수행되지만, ANSI-C 언어로 이루어져 있기 때문에 사용자의 편의에 따라 다양한 컴파일러를 사용할 수 있다. 명령어 사용 환경에서 운영되기 때문에 사용자는 먼저 프로그램에 필요한 간단한 변수와 실행 제어 변수를 입력하여 파일로 만들고, 이를 통해 프로그램을 제어한다.

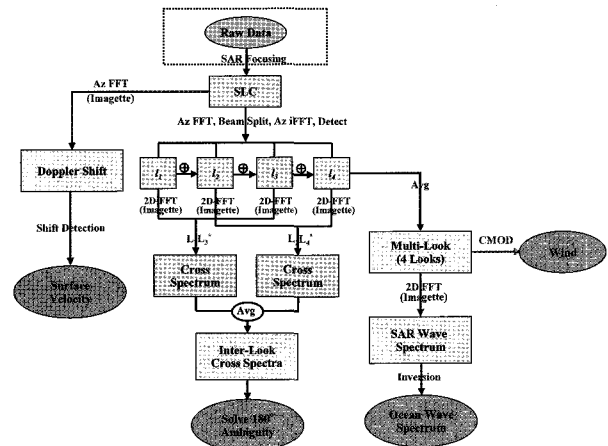


Fig. 1 Flowchart for SAR Ocean Processor.

Table 2 Input and output of SOP processor

Input: RADARSAT-1 SLC (CEOS Format)
Output:
1. SLC Header Off
2. Multilook Image (by average)
3. Wind:
- Backscattering Coefficient (Sigma_naught, dB)
- CMOD_4 Wind Speed (m/s)
- CMOD-IFR2 Wind Speed (m/s)
4. Wave:
- Wave Spectrum
- Interlook Cross Spectrum
- Multilook (from interlook processing)
5. Current:
- Doppler Image
- Doppler shift estimation(vector file)
- Velocity estimation (text file)

입력파일로는 원시자료(raw data)로부터 SAR focusing 과정을 거친 CEOS 포맷의 SLC 자료를 사용한다. 프로세서 수행결과 출력되는 파일은 해풍 정보인 CMOD4, CMOD-IFR2 자료, 파랑 정보를 갖고 있는 SAR 영상으로부터 추출된 파랑 스펙트럼, inter-look cross-spectra 자료이며, 해류의 속도 정보를 산출할 수 있는 Doppler shift 결과 자료이다(Table 2). 모든 결과는 원격탐사 및 GIS 전용 상용 프로그램으로 손쉽게

열어볼 수 있도록 설계하였다.

4. 연구결과

본 연구에서 사용된 자료는 RADARSAT-1 영상자료로 제주도 인근 해역을 포함한 1999년 11월 15일, 1999년 11월 25일, 1999년 12월 19일 3개 영상과 2004년 11월 8일 관측된 서해안 인근 해역의 1개 영상이다. SOP 프로세서 수행 결과 도출된 자료를 비교 분석하기 위한 현장자료로는 우도에서 관측된 AWS (automatic weather system) 기상자료와 국립해양조사원(www.nori.go.kr)에서 제공하는 인천 인근의 서해안 해역의 조류예측도 자료를 참조하였다.

2절에서 기술한 CMOD4와 CMOD-IFR2 모델을 적용하여 산출된 풍속과 후방산란계수(σ^0)의 관계를 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2에 도시된 그래프는 1999년 11월 15일 제주 인근 해역의 수십 km 영역에 해당하며, 추출된 후방산란계수와 풍속 값은 일반적인 해상의 상태에서 나타나는 분포 경향과 풍속 값을 보이고 있다. 대략 -20~-5 dB 범위의 후방산란계수 값을 보이며, 각각의 산란모델에 따라 1~11 m/s의 풍속 값을 보이고 있다.

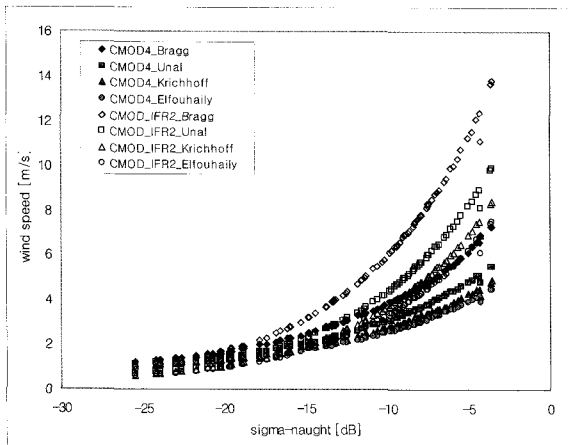


Fig. 2 Plot of wind speed estimated using CMOD4 and CMOD-IFR2 models for different backscattering coefficient (σ^0).

실제로 CMOD4나 CMOD-IFR2 경험모델과 편광 비례식을 적용하여 풍속을 추정할 때 입사각과 같은 시스템적 요소와 바람의 강약 정도에 따른 해양 환경적인 요소에 따라 경험식과 편광 비례식에서 산란모델을 적절히 선택할 필요가 있다. 입사각의 크기가 45° 정도로 큰 경우나 태풍이나 허리케인과 같이 후방산란계수 값이 -10 dB 이상으로 나타나는 해상의 경우는 더욱 적합한 경험식과 비례식의 조합을 필요로 한다.

Fig. 3은 1999년 12월 19일 RADARSAT-1 영상자료로부터 제주도 인근 해역에서 추출된 파랑 스펙트럼과 cross-spectra 과정을 통해 도출된 amplitude, real, imaginary 크로스 스펙트럼(cross spectrum) 결과를 도시한 것이다. Wave-SAR 변환

식을 적용하여 추출된 파랑 스펙트럼과 amplitude의 크로스 스펙트럼 결과는 \vec{k}_0 , $-\vec{k}_0$ 위치에서 값을 보이는 대칭 형태를 보이며, real과 달리 imaginary 결과는 비대칭 형태를 나타내고 있다. 파랑의 진행방향은 추출된 imaginary 스펙트럼 결과에서 (+)쪽으로 결정된다. Fig. 3은 GCP (ground correction point) 보정 전 영상으로 imaginary 결과에서 오른쪽 방향이 파랑의 진행방향이다. GCP 보정 이후의 결과인 Fig. 4 (C)에서 보면, 오른쪽 아래 방향에 해당된다.

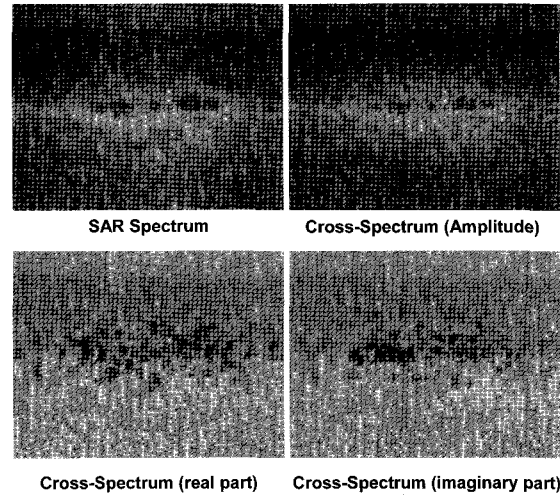


Fig. 3 SAR wave spectrum and inter-look cross-spectra (128x128 imagette).

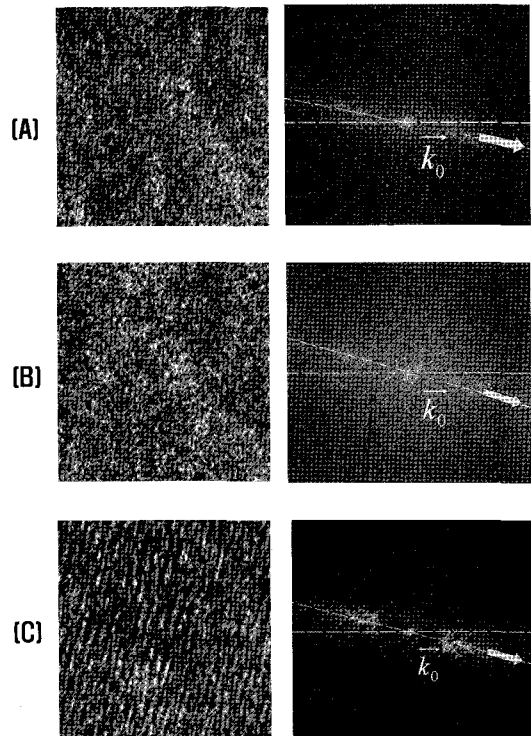


Fig. 4 Multi-look images (left) and SAR wave spectrum results (right) for 256x256 imagette. GCP corrected images: (A) 1999/11/15, (B) 1999/11/25, (C) 1999/12/19.

Fig. 4는 wave-SAR 변환식을 적용한 256×256 imagette 결과 영상이며, 파랑의 크기인 파장(wavelength)을 구하기 위해 추출된 파랑 스펙트럼으로부터 파수벡터 \vec{k}_0 를 구하고, 식 (11)로부터 파랑의 파장(λ)을 산출하여 Table 3에 정리하였다. Fig. 4에 도시된 영상지역은 제주도 인근 해역이며, 1999년 11월 15일, 1999년 11월 25일, 1999년 12월 19일에 관측된 자료들이다. Fig. 4의 영상은 수 km 범위의 imagette 크기로 (C)의 multi-look 영상을 살펴보면, (A), (B)에 비해 파랑이 충분히 발달된 너울(swell)의 형태가 선형적 패턴으로 나타나며, 파정(wave crest)과 안테나 쪽을 향하고 있는 면이 밝게 보이는 영상 특징을 나타내고 있다. 오른쪽에 도시된 파랑 스펙트럼의 형태 또한 (A)와 (B)는 분산된 형태를 보이는 반면 (C)는 대칭적으로 뚜렷한 형태를 나타내고 있다.

Table 3 Ocean wave direction and wavelength extracted from RADARSAT-1 images and automatic weather system (AWS) data

영상취득날짜		1999년 11월 15일 (A)	1999년 11월 25일 (B)	1999년 12월 19일 (C)
파랑자료 (위성영상 분석)	측정파향	281° (± 4°)	286° (± 10°)	281° (± 1°)
	측정파장	94.5 m (± 14 m)	99.5 m (± 28 m)	156 m (± 8 m)
바람자료 (AWS)	평균풍향	285°	277°	280°
	지속시간	2일 정도	1일 이하	7일 이상
	평균풍속	9 ㎧	11 ㎧	7 ㎧

Table 3에 정리된 바와 같이 12월 19일(C) 영상은 AWS 자료를 살펴볼 때 평균풍향 280°, 평균풍속 7 ㎧의 바람이 7일 이상 지속되어 풍랑이 충분히 발달될 수 있는 조건으로 앞서 기술한 바와 같이 너울의 형태를 살펴볼 수 있다. 상대적으로 11월 15일(A)과 11월 25일(B) 영상에서는 너울의 형태를 육안으로 식별하기는 어려우며, 부분적인 영역에서 파랑의 특성을 보이고 있는 정도이다.

일반적으로 너울과 같이 충분히 발달된 파로 발전하기 위해서는 3일 이상의 지속시간이 필요함을 고려해볼 때 11월 15일과 11월 25일 영상은 뚜렷한 파랑의 특성을 나타내기엔 부족한 기상상태였음을 알 수 있다. 풍랑이 너울과 같이 충분히 발달된 경우는 영상 내에서 육안식별로도 파랑의 특징을 구별할 수 있을 뿐 아니라 스펙트럼 분석 결과도 신뢰할만한 값과 오차범위를 보임을 알 수 있다. AWS 기상자료는 파랑의 진행방향에 대한 직접적인 정보를 제공하지는 못하지만 파랑의 발달 정도와 방향성을 가능해볼 수 있는 참고자료로 활용 가능할 것으로 판단되며, 영상처리결과와 비교하여 볼 때 파랑 스펙트럼 및 크로스 스펙트럼 결과들과 부합함을 알 수 있었다.

Fig. 5는 Doppler shift 기법을 적용하여 추출된 속도 벡터 결과를 multi-look 영상에 중첩하여 도시한 그림이다. 화살표

는 속도 벡터의 방향과 크기에 따라 나타나며, 길이가 길수록 이동속도가 빠르며, LOS 방향에 한정된 안테나를 향하는 쪽(왼쪽)과 반대쪽(오른쪽)으로 나타나고 있다. 도시된 영상 지역은 서해안 인근 덕적도 남쪽 해역이다. 이때 계산된 이동속도(current speed)는 수십 cm에서 4 ㎧ 구간의 값을 보였으며, 이동방향은 왼쪽과 오른쪽이 혼재되어 있으나 전반적으로 왼쪽으로 나타나고 있다. 위에서 언급했듯이 Doppler shift 기법은 위성체의 진행방향에 수직하며, 레이더 파의 진행방향인 시야방향(LOS)에 대한 정보만을 추출할 수 있는 한계가 있다. 따라서 해류의 이동방향에 대한 정보는 시야방향으로 가까워지는 경우와 멀어지는 경우로 나누어지며, 다른 방향의 벡터 성분은 산출하지 못하는 한계점이 남아 있다.



Fig. 5 Surface current velocity estimation results (2004/11/8, 18:30, Duckjeok island, southern region). The arrows represent velocity vector direction.

Fig. 6은 국립해양조사원에서 제공하는 예측조류도 자료이다. 사용된 RADARSAT-1 영상자료가 관측된 2004년 11월 8일 오후 6시 30분 자료이며, 네모 상자 영역은 Fig. 5에 도시된 영상과 같은 지역이다. 이는 실측자료가 아닌 예측자료이므로 오차가 있을 수 있으나 덕적도 주변 해역의 경우 대략 서쪽으로 이동방향이 나타나고 있다. Fig. 5의 결과는 단순히 시야방향에 대한 정보의 한계성이 있으나 전반적으로 왼쪽으로 나타나고 있으며, 이는 조류의 예측 방향과 부합되는 결과를 보이고 있다.

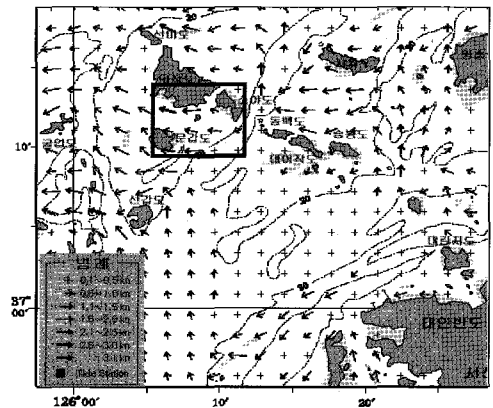


Fig. 6 Sea current simulation data (2004/11/8 18:30, National Oceanographic Research Institute).

5. 결 론

본 연구에서 개발된 SOP 프로세서는 해상에서 발생하는 해풍, 파랑, 해류의 특성과 관련 물리량을 산출하기 위한 것으로 해풍 정보 추출을 위해 CMOD4와 CMOD-IFR2 경험모델을 적용하였다. 일반적으로 적용되고 있는 wave-SAR 변환식과 inter-look cross-spectra 기법을 통해 파랑의 크기와 방향 정보를 추출하였으며, Doppler shift 기법으로부터 해류나 해상에서의 움직임에 대한 이동속도와 방향 정보를 산출하였다. SOP 수행결과와 현장관련 자료를 비교하여 본 결과 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 추후 해양에서 발생하는 다양한 현상을 관측한 영상자료 및 이와 관련된 현장 실측자료들이 확보되고, 정확하고 정밀한 정보 추출을 위한 알고리즘 보완 및 수정 단계를 거치게 되면 더욱 향상된 정보추출이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2006년도 해양연구원 기본 사업인 기상재난파에 의한 해양 구조물의 안전성 평가기술개발 사업의 지원을 받았다.

참 고 문 헌

- [1] 김덕진 (2001), "인공위성 SAR 자료를 이용한 해상풍 벡터 추출", 석사학위논문, 서울대학교.
- [2] 김덕진 (2005), "SAR를 이용한 해양의 해상풍, 해류, 파랑 및 내부파의 정량적 원격탐사", 박사학위논문, 서울대학교.
- [3] 양찬수 (2006), "SAR에 의한 파랑 방향스펙트럼 추정에 관한 연구", 2006 춘계학술대회 논문집, 대한원격탐사학회, pp. 71-74.
- [4] Alpers, W. R. and Rufenach, C. L. (1979), "The Effect of Orbital Motions on Synthetic Aperture Radar Imagery of Ocean Waves", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. AP-27, No. 5, pp. 685-690.
- [5] Alpers, W. R., Ross, D. B. and Rufenach, C. L. (1981), "On the Detect Ability of Ocean Surface Waves by Real and Synthetic Aperture Radar", Journal of Geophysical Research, Vol. 86, No. C7, pp. 6481-6498.
- [6] Bao, M. and Alpers, W. (1998), "On the Cross Spectrum Between Individual-Look Synthetic Aperture Radar Images of Ocean Waves", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 3, pp. 922-932.
- [7] Brüning, C., Alpers, W. R., and Schroeter, J. G. (1991), "On the Focusing Issue of Synthetic Aperture Radar Imaging of Ocean Waves", IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-29, No. 1, pp. 120-128.
- [8] Chapron, B., Collard, F., and Ardhuin, F. (2005), "Direct Measurements of Ocean Surface Velocity from Space: Interpretation and Validation", J. of Geophysical Research, Vol. 110, pp. 1-17.
- [9] Curlander, J. C. and McDonough, R. M. (1991), "Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [10] Dowd, M., Vachon, P. W., Dobson, F. W., and Olsen R. B. (2001), "Ocean Wave Extraction from RADARSAT Synthetic Aperture Radar Inter-Look Image Cross-Spectra", IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, pp. 21-37.
- [11] Elachi, C. (1988), "Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques", IEEE Press, New York.
- [12] Elachi, C. and Brown, W. E. (1977), "Models of Radar Imaging of the Ocean Surface Waves", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. AP-25, No. 1, pp. 84-94.
- [13] Engen, G. and Johnsen, H. (1995), "SAR-Ocean Wave Inversion Using Image Cross Spectra", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 33, No. 4, pp. 1047-1056.
- [14] Farquharson, G., Junek, W. N., Ramanathan, A., Frasier, S. J., Tessier, R., McLaughlin, D. J., Sletten, M. A., and Toporkov, J. V. (2004), "A Pod-Based Dual-Beam SAR", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 1, No. 2, pp. 62-65.
- [15] Frasier, S. J. and Camps, A. J. (2001), "Dual-Beam Interferometry for Ocean Surface Current Vector Mapping", IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 2, pp. 401-414.
- [16] Hasselmann, K. and Hasselmann, S. (1991), "On the Nonlinear Mapping of an Ocean Wave Spectrum into a Synthetic Aperture Radar Image Spectrum and Its Inversion", J. Geophysical Research, Vol. 96, pp. 10713-10729.
- [17] Hasselmann, S., Brüning, C., Hasselmann K. and Heimbach P. (1996), "An Improved Algorithm for the Retrieval of Ocean Wave Spectra from Synthetic Aperture Radar Image Spectra", J. of Geophysical Research, Vol. 101, No. C7, pp. 16615-16629.
- [18] Horstmann, J., Koch, W., Lehner, S., and Tonboe, R. (2000), "Wind Retrieval over the Ocean using Synthetic Aperture Radar with C-band HH Polarization", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 5, pp. 2122-2131.
- [19] IFREMER-CERSAT (1999), "Off-Line Wind Scatterometer ERS Products: User Manual, Technical Report

- C2-MUT-W-01-IF", IFREMER-CERSAT.
- [20] Ivanov, A. V. (1982), "On the Synthetic Aperture Radar Imaging of Ocean Surface Waves", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. OE-7, No. 2, pp. 96-103.
- [21] Jain, A. (1981), "SAR Imaging of Ocean Waves: Theory", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. OE-6, No. 4, pp. 130-139.
- [22] Moore, R. K. (1985), "Radar Sensing of the Ocean", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. OE-10, No. 2, pp. 84-113.
- [23] Mouchot, M. C., and Garello, R. (1998), "SAR for Oceanography" in Henderson, F. M. and Lewis, A. J., Ed., Principles & Application of Imaging Radar, John Wiley & Sons, New York.
- [24] Raney, R. K. (1980), "SAR Response to Partially Coherent Phenomena", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. AP-28, No. 6, pp. 777-787.
- [25] Raney, R. K. (1981), "Wave Orbital Velocity, Fade and SAR Response to Azimuth Waves", Journal of Oceanic Engineering, Vol. OE-6, No. 4, pp. 140-146.
- [26] Stoffelen, A. and Anderson, D. (1997a), "Scatterometer Data Interpretation: Estimation and Validation of the Transfer Function CMOD4", J. of Geophysical Research, Vol. 102, No. C3, pp. 5767-5780.
- [27] Stoffelen, A. and Anderson, D. (1997b), "Scatterometer Data Interpretation: Measurement Space and Inversion", J. of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 14, pp. 1298-1313.
- [28] Swift, C. T. and Wilson, L. R. (1979), "Synthetic Aperture Radar Imaging of Moving Ocean Waves", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. AP-27, No. 6, pp. 725-729.
- [29] Tomiyasu, K. (1978), "Tutorial Review of Synthetic Aperture radar (SAR) with Applications to Imaging of the Ocean Surface", Proceedings of IEEE, Vol. 66, No. 5, pp. 563-583.
- [30] Toporkov, J. V., Perkovic, D., Farquharson, G., Sletten, M., and Frasier, S. J. (2005), "Sea Surface Velocity Vector Retrieval Using Dual-Beam Interferometry: First Demonstration", IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 11, pp. 2494-2502.

원고접수일 : 2006년 12월 28일

원고채택일 : 2007년 2월 26일