

SAR 영상자료를 이용한 해양 파라미터 추출 기법 연구

강문경^{1*}, 박용욱², 이훈열¹, 이문진³

¹강원대학교 지구물리학과 · ²(주)쓰리지코어 · ³한국해양연구원 해양시스템안전연구소

^{1*}kangmk@chonnam.ac.kr, ²pyw2785@3gcore.com,

¹hoonyol@kangwon.ac.kr, ³Moonjin.Lee@moeri.re.kr

Study on the extraction of ocean parameters using SAR image data

Moon-Kyung Kang^{1*}, Yong-Wook Park², Hoonyol Lee¹, Moonjin Lee³

요 약 : 최근 인공위성 SAR를 이용한 기술은 해풍, 파랑, 해류 등과 같은 해양에서 발생되는 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

1. 서 론

최근 인공위성 원격탐사는 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 SAR 나 scatterometer 시스템의 사용이 필수적이라 할 수 있다

합성구경 레이더(synthetic aperture radar)는 영상 레이더(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.

해상의 표면파(surface waves), 내부파(internal waves), 해류(currents), 바람(wind), 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

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 (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° 모호성의 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

Table 1은 본 연구에 적용된 해풍, 파랑, 해류별 각각의 연구기법과 추출 가능한 해양 특성의 물리량과 한계점을 정리한 표이다. 본 연구에서는 SAR 영상에서 해풍, 파랑,

해류의 특성과 관련된 물리량을 종합적으로 추출하기 위해 이와 관련된 연구 기법들을 적용하였다.

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. 파랑 정보 추출 기법 중 wave-SAR 변환 기법은 방향에 대한 180° 모호성을 해결하지 못하는 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.

Table 1 Methods on satellite oceanography using SAR

Target	Wind	Wave		Surface Velocity	
Methods Values	Wind Retrieval Models	Wave-SAR Transform	Inter-Look Cross-Spectra	Doppler Shift	Dual-Beam ATI
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

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 추출

하도록 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.

SLC 자료를 사용한다. 프로세서 수행 결과 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 원격 탐사 및 GIS 전용 상용 프로그램으로 손쉽게 열어볼 수 있도록 설계하였다.

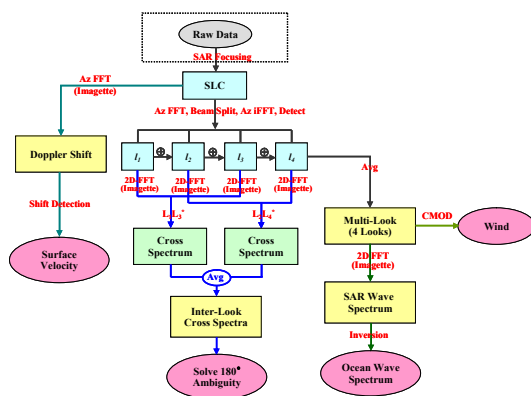


Fig. 1. Flowchart for SAR Ocean Processor.

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

4. 연구결과

본 연구에서 사용된 RADARSAT-1 영상 자료는 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.

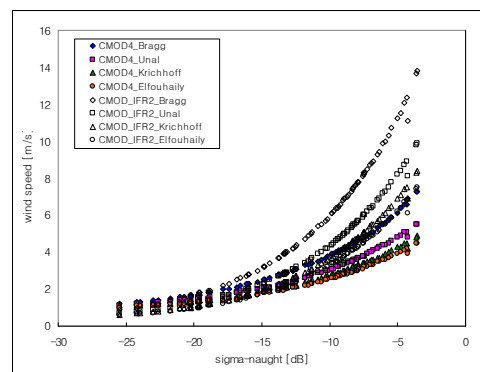


Fig. 2. Plot of wind speed estimated using CMOD4 and CMOD-IFR2 models.

Fig. 2에 도시된 그래프는 1999년 11월 15일 제주 인근 해역의 수십 km 영역에서

추출된 결과이다. 대략 $-20 \sim -5$ dB 범위의 후방산란계수 값을 보이며, 각각의 산란모델에 따라 1~11 m/s의 풍속 값을 나타내고 있다.

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 변환식을 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.

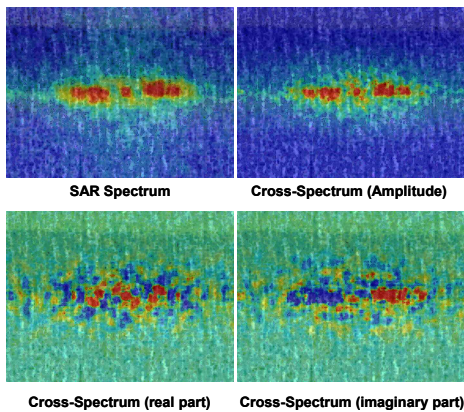


Fig. 3. SAR wave spectrum and inter-look cross-spectra (128×128 imagette).

Fig. 4는 wave-SAR 변환식을 적용한 256×256 imagette 결과 영상이며, 파랑의

파장(wavelength)을 구하기 위해 추출된 파랑 스펙트럼으로부터 파수벡터 \vec{k}_0 를 구하고, 관련 식으로부터 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 범위로 (C)의 multi-look 영상을 살펴 보면, (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 보이고 있다.

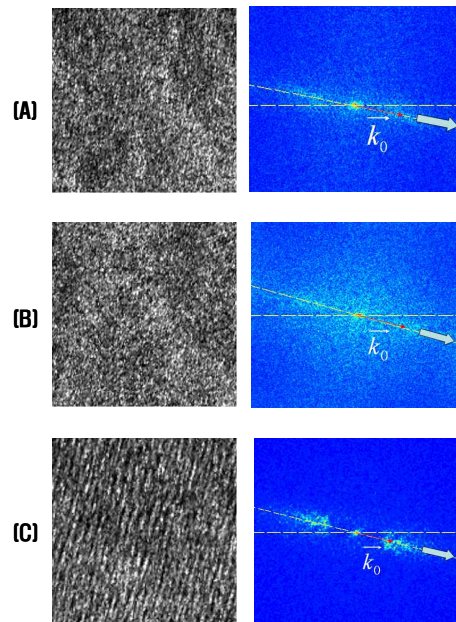


Fig. 4. Multi-look images (left) and SAR wave spectrum results (right) for 256×256 imagette. GCP corrected images: (A) 1999/11/15, (B) 1999/11/25, (C) 1999/12/19.

Table 3에 정리된 바와 같이 12월 19일

(C) 영상은 AWS 자료를 살펴볼 때 평균풍향 280°, 평균풍속 7 m/s의 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. 풍랑이 너울과 같이 충분히 발달된 경우는 영상 내에서 육안식별로도 파랑의 특징을 구별할 수 있을 뿐 아니라 스펙트럼 분석 결과도 신뢰할만한 값과 오차범위를 알 수 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 m/s	11 m/s	7 m/s

Fig. 5는 Doppler shift 기법을 적용하여 추출된 속도 벡터 결과를 multi-look 영상에 중첩하여 도시한 그림이다. 화살표는 속도 벡터의 방향과 크기에 따라 다르며, 길이가 길수록 이동속도가 빠르고, LOS 방향에 한정된 안테나를 향하는 쪽(왼쪽)과 반대쪽(오른쪽) 방향만을 나타내고 있다.

도시된 영상 지역은 2004년 11월 8일 서해안 인근 덕적도 남쪽 해역이다. 이때 계산된 이동속도(current speed)는 수십 cm에서 4 m/s 구간의 값을 보였으며, 이동방향은 왼쪽과 오른쪽이 혼재되어 있으나 전반적으로 왼쪽으로 나타나고 있다. 위에서 언급했듯이

Doppler shift 기법은 위성체의 진행방향에 수직하며, 레이더 파의 진행방향인 시야방향에 대한 정보만을 추출할 수 있는 한계성이 남아 있다.

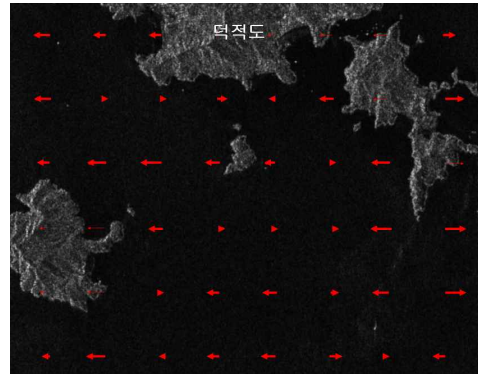


Fig. 5. Surface current velocity estimation results (2004/11/8, 18:30, Duckjeok island, southern region). The arrows represent velocity vector direction.

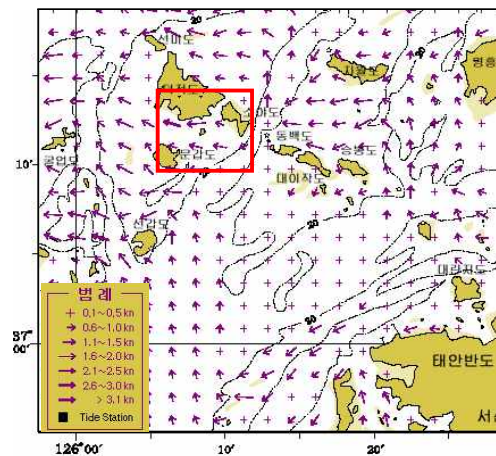


Fig. 6. Sea current simulation data (2004/11/8 18:30, National Oceanographic Research Institute).

Fig. 6은 국립해양조사원에서 제공하는 예측조류도 자료이다. RADARSAT-1 영상자료가 관측된 2004년 11월 8일 오후 6시 30

본 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 나타내고 있으며, 이는 조류의 예측 방향과 부합되는 결과를 보이고 있다.

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. 파랑의 크기와 방향 추출은 wave-SAR 변환식과 inter-look cross-spectra 기법을 사용하였으며, 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 획득 및 현장 실측자료들이 확보되고, 알고리즘 보완 및 수정 단계를 거치게 되면 더욱 향상된 정보추출이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

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

참 고 문 헌

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] IFREMER-CERSAT (1999), "Off-Line Wind Scatterometer ERS Products: User Manual, Technical Report C2-MUT-W-01-IF", IFREMER-CERSAT.

[7] 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.

[8] Stoffelen, A. and Anderson, D. (1997b), "Scatterometer Data Interpretation: Measurement Space and Inversion", J. of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 14, pp. 1298-1313.