

인공위성영상을 이용한 해수유동 정보 추출

이문진* · 김혜진* · 황호진* · 이승현*

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Analysis of Satellite image to extract Ocean Currents

Moonjin Lee* · Hye-Jin Kim* · Ho-Jin Hwang* · Seung-Hyun Lee*

*, ** Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Korea

요 약 : 인공위성영상을 이용한 해양정보 추출을 위하여 SAR 위성영상을 이용한 해수유동 정보 추출을 연구하였다. SAR(Synthetic Aperture Radar) 위성영상의 도플러 쉬프트 정보를 이용한 해수유동 정보 추출은 적용기술의 근본적 한계로 인하여 실제 유속이 아니라 위성궤도의 법선방향에 대한 유속강도만을 제시하는 문제가 있다. 이러한 한계 및 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 위성영상 촬영과 동일한 시간에 동일한 해역에서 해수유동을 관측하고, 관측된 해수유동 정보를 이용하여 위성영상에서 추출된 해수유동 정보를 보완 검증하였다. 위성영상 추출 해수유동정보의 위성궤도 법선방향 유속강도는 관측된 해수유동 유향분포도에 근거하여 실제 해수유동 유향에 맞게 보정될 수 있었으며, 보정된 해수유동 정보는 실제 해수유동 분포를 잘 반영할 수 있었다.

핵심용어 : SAR 위성영상, 도플러 쉬프트, 해수유동 정보, 해수유동 관측

1. 서 론

최근 위성원격탐사(satellite remote sensing)는 해양학 분야에서 경제적이고 필수적인 도구로 부각되고 있다. 특히 해양과 관련된 원격탐사 활용분야에서는 대기나 기상 상태에 따른 제약점이 없고, 주야에 무관하게 수시로 변화하는 해양의 상태를 고해상도 영상 정보로 제공하는 레이더시스템인 SAR(Synthetic Aperture Radar)의 활용이 필수적이라 할 수 있다(Curlander and McDonough, 1991). 따라서 국내·외적으로 SAR 영상자료를 이용하여 해양의 대표적인 현상인 해수유동(currents), 파랑(waves), 바람(winds) 등에 대한 정성적, 정량적 정보를 추출하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있는 상황이다 (해양연구원, 2006).

SAR를 이용한 해양 부분의 초기 연구는 해양과 관측 센서 간의 기하학적 관계 등 기본원리에 관한 연구(Elachi and Brown, 1977; Tomiyasu, 1978; Jain, 1981; Ivanov, 1982; Moore, 1985)가 주를 이루었으며, 이후 해양의 역학적 움직임과 현상을 이해하고 파악하기 위한 현상학적 해양 파라미터의 추정 및 검증에 관한 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)들도 진행되어 왔다. 최근에는 선박, 구조물, 기상재해 등 해양활동과 관련된 다양한 기술적 응용 분야와 알고리즘의 수정보완 및 개발(Dowd et al., 2001; Bao and Alpers, 1998; Engen and

Johnsen, 1995; Chapron et al., 2005)에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있으며, interferometry 기술이나 polarimetry 기술을 적용한 응용 연구들과 dual-beam ATI (Along-Track Interferometry)와 같은 새로운 시스템 개발과 관련된 연구(Toporkov et al., 2005; Farquharson et al., 2004; Frasier and Camps, 2001)들이 시도되고 있다.

이러한 연구들을 통하여 SAR 위성영상을 이용한 해수유동, 해상풍, 파랑 등의 정량적, 정성적 정보 추출을 위한 이론적 연구는 상당한 진척을 보이고 있으나, 적용기술의 근본적인 한계로 물리량의 절대 값을 추출하지 못하는 문제점은 해결되지 못하고 있다. 본 연구에서는 이러한 SAR 위성영상 활용의 일환으로 SAR 위성영상자료를 이용한 해수유동 정보 추출을 연구하였다. SAR 위성영상의 도플러 쉬프트 정보를 이용한 해수유동 정보 추출에서는 적용기술의 근본적 한계로 인하여 실제 유속이 아니라 위성궤도의 법선방향에 대한 유속강도만을 추출하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 한계 및 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 해수유동 현장관측을 통하여 SAR 위성영상에서 추출된 해수유동정보의 보정 및 검증방안을 제시하고자 한다.

2. SAR 위성영상을 이용한 해양정보 추출

SAR는 영상레이더(imaging radar)의 일종으로서 파랑, 해수유동, 해상풍 등의 자연현상과 함께 선박 운항정보, 유출유 확산정보 등을 영상으로 모니터링할 수 있는 원격탐사시스템이다. SAR 위성영상을 이용한 해양정보 추출에는 SAR 위성영상 자료에 포함된 후방산란계수(back scattering coefficient), 공간적 스펙트럼 분포(spectral distribution), 도플러 쉬프트

* 대표저자 : Moonjin.Lee@moeri.re.kr

(doppler shift) 등의 물리량이 이용되며, SAR 위성영상자료를 이용한 표면파(surface waves), 내부파(internal waves), 해수 유동(currents), 바람(winds), 해저 지형에 따른 현상들(bathymetric features), 선박 항적(ship wakes), 기름 유출(oil spills) 등의 해양 정보 추출 연구는 이미 여러 차례 보고된 바 있다(Elachi, 1988; Mouchot and Garello, 1998).

SAR 위성영상자료를 이용한 해상풍 정보 추출에는 후방산란계수를 이용하는 CMOD4 (Stoffelen and Anderson, 1997a; 1997b)와 CMOD_IFR2 (IFREMER-CERSAT, 1999; Quilfen et al., 1998) 경험 모델이 활용된 바 있으며, 편광 비(polarization ratio)를 이용한 비례식(Horstmann et al., 2000)이 적용된 바 있다. 파랑 정보 추출에서는 Wave-SAR 역산 방법을 통해 파랑의 스펙트럼을 추출하고 파장과 파의 진행방향을 산출하며, 이 때 발생하는 파랑 방향에 대한 180° 모호성(ambiguity)의 문제를 해결하기 위하여 inter-look cross-spectra 기법(Dowd et al., 2001; Bao and Alpers, 1998; Engen and Johnsen, 1995)이 적용된 바 있다. 또한 해수유동 정보는 SAR 영상이 얻어지는 시간 동안에 해양 표면이 움직이면서 발생하는 도플러 쉬프트를 이용한 기법(Chapron et al., 2005)으로 산출되고 있다.

이와 같이 해양 정보 추출을 위한 여러 연구들이 진행되고 있으나, 아직까지 각각의 연구는 결과의 활용에 한계를 가지고 있다. Table 1은 해상풍, 파랑, 해수유동류별로 각각의 연구기법과 각각의 한계를 정리한 표이다. 해상풍 정보 추출을 위한 CMOD4와 CMOD_IFR2 모델은 10~20 m의 영상 해상도 내의 풍속 정보를 얻을 수 있으나, 풍향에 대한 정보는 현장자료나 관련 자료를 참조하여 해결해야 하는 한계점이 있다. 파랑 정보 추출을 위한 wave-SAR 변환 기법은 방향에 대한 180° 모호성을 해결하지 못하는 한계가 있으며, inter-look cross-spectra 기법을 병행하여 파향을 결정하여야 한다. 그러나 파랑 추출에 있어 파장이 SAR 영상의 해상도보다 작은 경우 파랑정보를 추출할 수 없는 한계가 있다. 해수유동의 경우 Doppler shift 기법으로 정보를 추출할 수 있으나, 절대 유향이 아닌 위성 진행방향의 법선방향인 LOS (Line of Sight) 방향에 대해 투영된 유속정보만을 추출할 수 있다.

Table 3. Methods on Satellite Oceanography by using SAR image

Target	Winds	Waves		Currents	
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

SAR 위성영상은 다른 위성영상과 차별화된 정보로서 해상풍, 파랑, 해수유동 등의 정보를 제공할 수 있다. 그러나 현재의 기술에서는 각 정보의 절대 값을 얻는데는 한계가 있으며, 이러한 한계를 극복하기 위해서는 현장의 관측이 활용되고 있다. 현장관측자료는 SAR 위성영상 분석에 있어 절대값 결정을 위한 보완자료로 활용될 뿐만 아니라, 위성영상에서 추출된 결과의 검증에도 활용된다. 본 연구에서는 SAR 위성영상을 이용하여 해양 정보 중 해수유동 정보를 추출하였으며, 위성영상 촬영과 동일한 시기에 동일해역에서 해수유동을 관측하여 위성영상 추출 해수유동 정보를 보완 검증하였다.

3. SAR 영상 분석

3.1 SAR 영상

SAR 위성영상을 분석하여 해수유동 정보를 추출하기 위하여 Table 2의 일정으로 Fig. 1의 영역에서 촬영된 RADARSAT 영상들 중 위성의 촬영조건, 현장의 관측일정 등을 고려하여 1번 영상을 활용하였다.

Table 4. Schedules of RADARSAT

	Shooting Time	Geographical Scope
1	03/30/2006 18:46:24	[34° 18'N, 127° 34'E] - [35° 01'N, 128° 20'E]
2	03/31/2006 18:17:11	[34° 14'N, 127° 44'E] - [35° 21'N, 128° 37'E]
3	04/01/2006 06:33:29	[34° 24'N, 127° 56'E] - [35° 09'N, 128° 14'E]

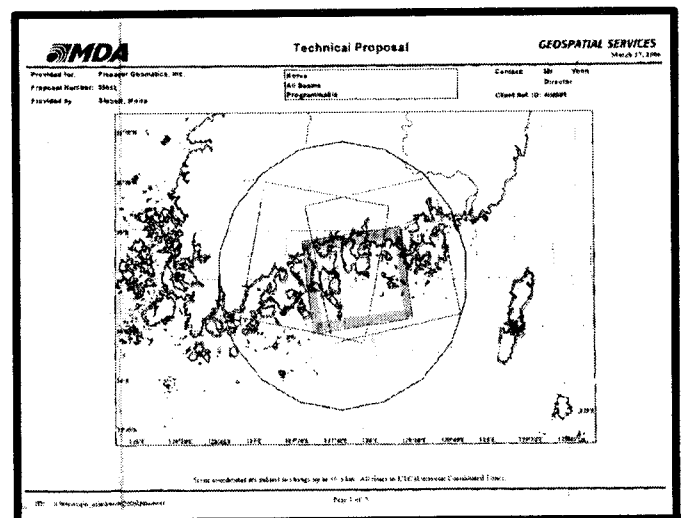


Fig. 1. Schedules of RADARSAT image.

3.2. 원시자료 변환 및 초기분석

SAR 영상을 이용하여 해양정보를 분석하기 위하여 캐나다의 Atlantis사가 개발한 상용시스템 EarthView를 활용하였다.

EarthView는 레이더 위성 자료처리 및 분석 전용 시스템으로서, 레이더 위성 영상 원시 자료를 이용하여 다양한 레벨의 영상 자료를 생성하고, 영상 보정 및 다양한 영상 처리 기능을 제공한다. 본 연구에서는 EarthView를 이용하여 레이더 위성 영상 원시 자료를 쉽게 사용할 수 있는 자료로 변환하고, 지리보정 및 공간 필터를 적용하여 해양정보를 분석하였다. EarthView의 주요 구성은 다음과 같다.

- EarthView™ SAR APP (Advanced Precision Processor): ERS-1, ERS-2, JERS-1, RADARSAT 등의 SAR raw 자료 처리 기본 프로그램.
- EarthView™ InSAR (Interferometry SAR): 동일지역 여러개 영상으로부터 interferometry 방법으로 DEM 생성하고 고도변화를 추출하는 프로그램. 같은 지역에 대한 2개 이상의 SAR 영상이 있어야 한다.
- Coherent Target Monitoring (CTM) Module: 특정지역 미세 고도변화 추출 기능을 수행한다. 프로그램 EV-InSAR 모듈로서 작동한다.
- EarthView® Stereo: 일부 지역은 겹치지만 서로 다른 떨어진 한쌍의 SAR 영상으로부터 digital terrain height model을 구성하는 프로그램.
- EarthView® DEMED: 여러 DEM (Digital Elevation Model)을 편집하고 영상을 관리하는 프로그램.
- EarthView® Matrix: Polarimetric SAR 영상 처리 프로그램. (참고: 일본 ALOS 위성 PALSAR 센서 (2005), 카

나다 Radarsat-2(2006)에 polarimetric SAR sensor 설치 예정.)

- OceanView™ Ocean Surveillance System: 해난구조에 필요한 해양 선박 및 물체 식별용 프로그램. 모든 SAR, SPOT, OrbView, Landsat, IRS 및 MODIS 영상등을 입력 정보로 활용한다.

RADARSAT 영상은 원시자료를 사용하기 쉬운 형태의 자료로 변환해야만 다음단계의 분석이 가능하다. 본 연구에서는 EarthView를 이용하여 RADARSAT 영상을 변환하였다. EarthView를 이용하여 변환된 RADARSAT 원시자료의 형태는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 원시자료의 초기 변환형태는 형상을 알아보기 어렵다. 초기 변환된 영상에 지리보정을 적용하면 Fig. 2에 제시한 바와 같이 실제 좌표계를 갖는 영상으로 변환될 수 있으며, 해도와도 중첩해서 지리정보를 확인할 수 있다. 보정된 영상의 정보식별 및 분석을 용이하게 하기 위하여 salt-pepper방식의 공간 필터를 적용하였다.

3.3. 해수유동 정보 추출

RADARSAT 영상을 이용한 해양정보의 추출은 해상풍, 해수유동, 파동 등에 대해 응용될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 정보들 중 해수유동 정보를 추출하고 검증하였으며, 추출된 해수유동 정보의 활용방안을 검토하였다.

RADARSAT 영상의 도플러 쉬프트 정보를 분석하면 Fig. 4에 제시된 바와 같이 촬영영역내의 어떤 움직임에 대한 속도의

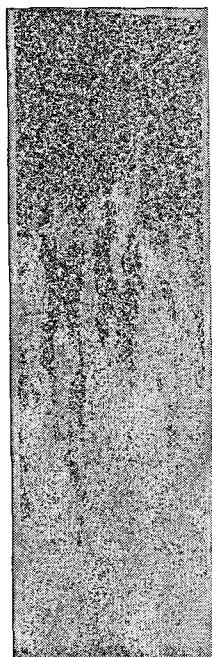


Fig. 2. Conversion of RADARSAT raw data by using EarthView.

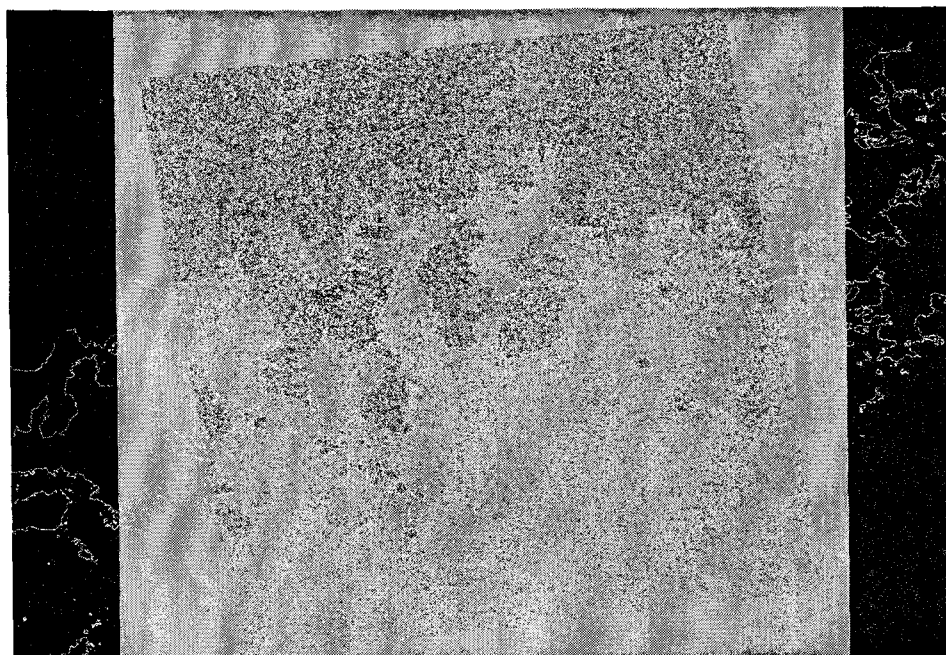


Fig. 3. RADARSAT image after geometric correction

강도를 추출할 수 있다. 여기서 속도의 강도는 해수유동의 유속만을 나타내는 것이 아니라, 촬영영역내의 모든 움직임에 대한 도플러 쉬프트를 속도로 환산하여 제시하고 있다. 또한 이러한 속도는 실제 움직임의 방향에 대한 속도가 아니라, 실제 움직임의 방향을 도플러 쉬프트 측정의 기준이 되는 위성의 시야 방향 (위성궤도의 법선방향)에 대해 투영한 속도로 산정된다. 따라서 위성에서 추출된 정보만을 이용할 경우 Fig. 4에 제시된 속도의 강도와 위성궤도의 법선방향에 대해 가까워지거나 멀어지는 방향을 적용하여 Fig. 5와 같이 가상의 속도장만을 재현할 수 있다.

이러한 속도장으로부터 해수유동 정보를 추출하기 위해서는 촬영영역 중 해양에 해당되는 영역의 속도장만을 추출하는 것이 필요하며, 위성궤도의 법선방향에 대해 산정된 속도를 실제 움직임의 방향에 대한 속도로 투영하는 정사보정이 필요하다. 본 연구에서는 RADARSAT 위성영상에서 추출된 속도장으로부터 해수유동 정보를 추출하기 위하여 동일시간 동일해역에 관측된 해수유동 정보를 이용하였다.

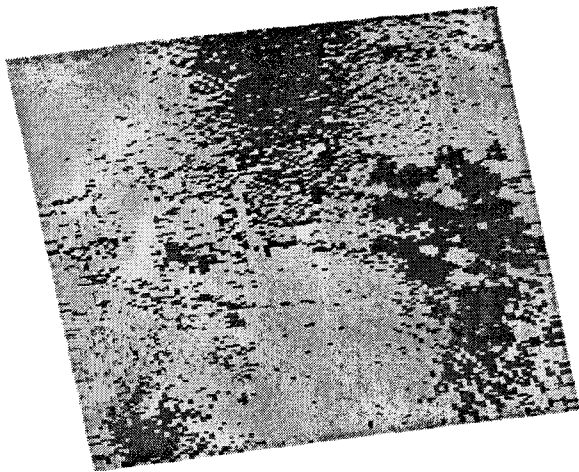


Fig. 4. Current speeds in the normal direction of RADARSAT orbit.

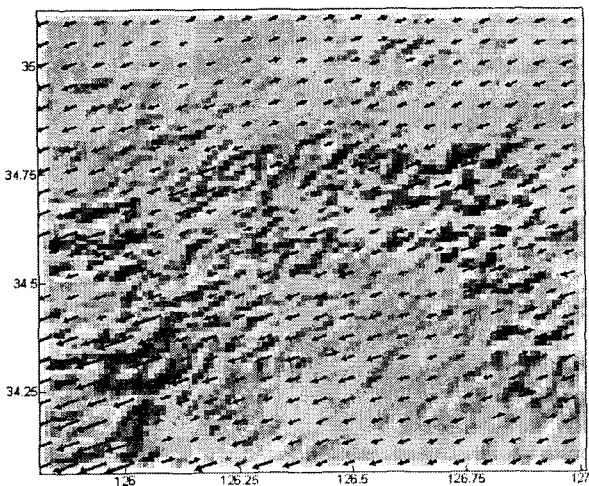


Fig. 5. Pseudo current vectors in the normal direction of RADARSAT orbit

4. 위성영상 추출 해수유동 보정 및 검증

4.1 현장관측

SAR 영상 추출 해수유동정보를 보정하기 위하여 위성영상 촬영시간을 고려하여 위성영상 촬영영역과 동일해역에서 해수유동을 관측하였다. 관측은 위성영상 촬영시간인 2006년 3월 30일 18:46:24를 고려하여 2006년 3월 30일 17:30~19:34의 약 2시간 4분 동안 수행하였다.

SAR 영상 분석을 위한 해수유동은 도플러(doppler)식 유속계 ADP(Acoustic Doppler Profiler, 미국 SonTek사 제품)와 DCS(Doppler Current Sensor, 노르웨이 Aanderaa사 제품)를 사용하여 관측하였다. ADP는 연속적으로 수심 250m까지 최대 100개 층의 유속을 동시에 측정할 수 있으며, 10Mb의 내부 메모리를 가지고 있어 10분 간격으로 약 1개월 동안 연속 측정이 가능한 유속계이다(SonTek, 1998). DCS는 특정 수심의 유속을 실시간으로 간편하게 측정할 수 있는 장비이다. 본 실험에서 사용된 유속계는 각각 ± 0.5 cm/sec의 정도를 가지며, $\pm 1^\circ \sim 2^\circ$ 의 흔들림은 자동 보정한다.

관측기간인 2006년 3월 30일 17:30~19:34의 약 2시간 4분 동안 해수유동은 5개 지점에서 관측되었으며, 관측지점 및 관측된 표면 해수유동의 분포는 Fig. 6에 제시된 바와 같다. 관측기간 동안 조류는 여수항 기준 최강창조로서 북서향이 우세하였으나, 남동향 및 동향의 바람 영향으로 표면 해수유동은 남서향이 우세한 것으로 나타났다.

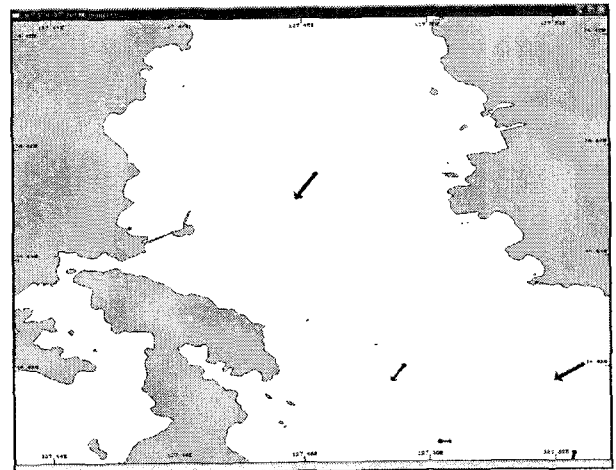


Fig. 6. Surface currents of Yeosu Bay during 17:30~19:34 in 30 Mar., 2006.

4.2 해수유동 검증 및 보정

RADARSAT 영상으로부터 추출된 해수유동정보를 보정하고 활용하기 위하여 관측자료를 활용하였다. 위성영상 추출 해수유동정보와 관측된 해수유동정보를 비교하기 위하여 Fig. 7에 나타난 바와 같이 위성영상 추출 해수유동정보 중 관측영역

내부의 정보만을 추출하였다. Fig. 6의 관측 유속분포에서 유향 분포를 공간적으로 내삽하면 관측영역내 해수유동의 유향분포는 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 이러한 관측 해수유동의 유향 분포를 적용하면 위성궤도의 범선방향으로 투영되어서 나타나는 위성영상 추출 해수유동분포를 실제 해수유동 분포로 보정할 수 있다. Fig. 9는 위성영상 추출 해수유동분포를 관측 해수유동 유향에 근거하여 보정한 결과이다. Fig. 9의 결과에서 보정된 위성영상 추출 해수유동분포는 실제 관측된 해수유동 분포와 유사한 양상을 보이는 것으로 나타났다.

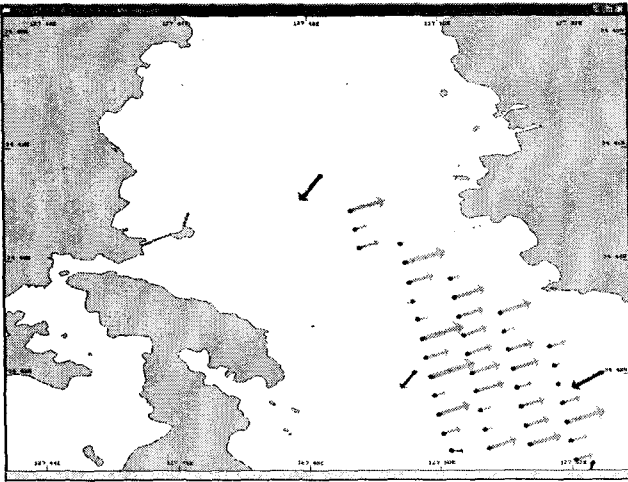


Fig. 7. Current speeds in the domain of observation.

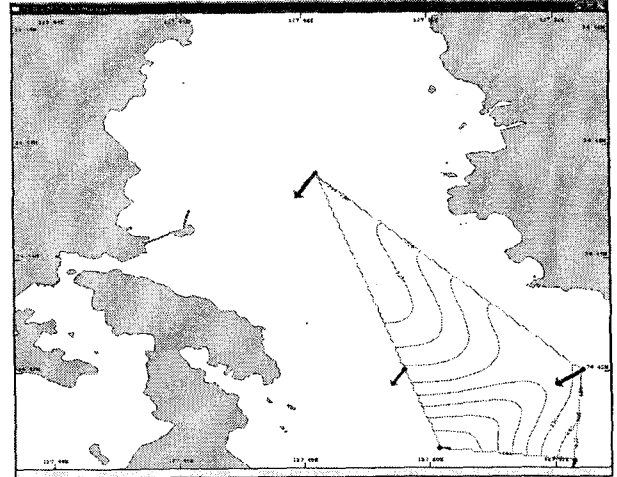


Fig. 8. Current direction map interpolated by observed currents

5. 결론 및 고찰

인공위성영상을 이용한 해양정보 추출을 위하여 SAR 위성영상을 이용한 해수유동 정보 추출을 연구하였다. SAR 위성영상의 도플러 쉬프트 정보를 이용한 해수유동 정보 추출은 적용기술의 근본적 한계로 인하여 실제 유속이 아니라 위성궤도의 범선방향에 대한 유속강도만을 제시하는 문제가 있다. 이러한 한계 및 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 위성영상 촬영과 동일한 시간에 동일한 해역에서 해수유동을 관측하고, 관

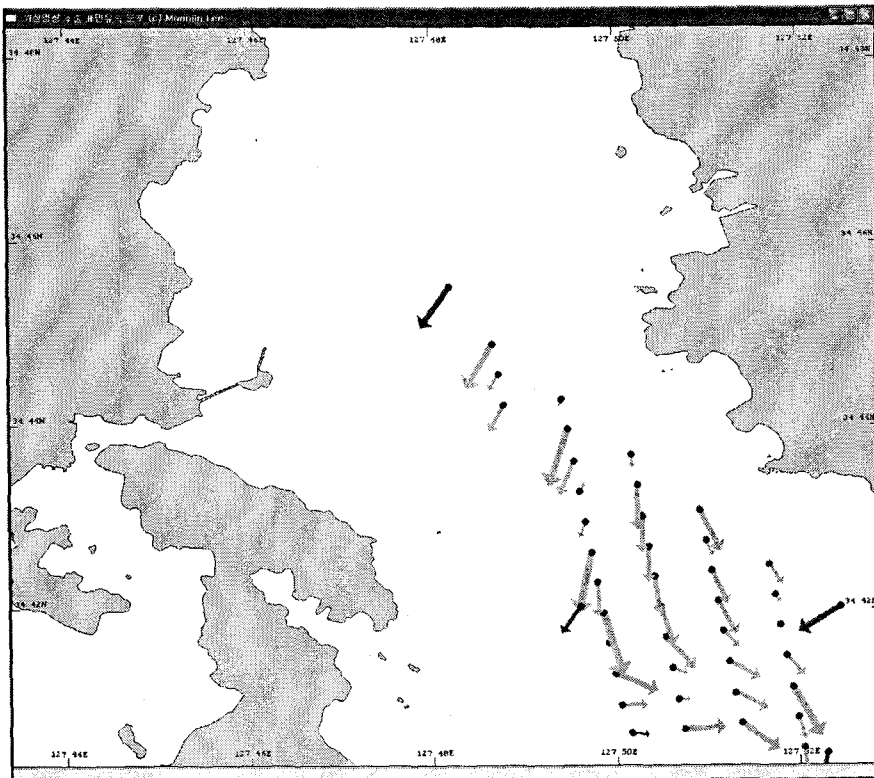


Fig. 9. Modified current vectors extracted from RADARSAT image.

측된 해수유동 정보를 이용하여 위성영상에서 추출된 해수유동 정보를 보완 검증하였다. 해수유동 관측에서는 위성영상 촬영 시간을 중심으로 해수유동의 시간적 정상성이 보장될 수 있는 기간 동안 가능한 넓은 영역의 해수유동을 관측하였으며, 관측된 해수유동 정보를 이용하여 관측된 해수유동의 유향분포도를 작성하였다. 위성영상 추출 해수유동정보의 위성궤도 법선방향 유속강도는 관측된 해수유동 유향분포도에 근거하여 실제 해수유동 유향에 맞게 보정될 수 있었으며, 보정된 해수유동 정보는 실제 해수유동 분포를 잘 반영할 수 있었다.

본 연구의 결과는 SAR 위성영상 추출 해수유동 정보의 실제 활용을 위한 연구의 기초자료로 활용될 수 있으며, 향후 보다 많은 실험과 연구를 통하여 인공위성 영상 추출 정보와 해양관측 정보간의 관계성 정립에 활용될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원에서 지원한 “기상 재난파에 의한 해양구조물의 안전성 평가기술 개발” 중의 일부이다.

참 고 문 헌

- [1] 한국해양연구원(2006), 기상 재난파에 의한 해양구조물의 안전성 평가기술 개발, pp, 425.
- [2] Aanderaa(2001), Operational Manual - Doppler Current Sensor 3900R.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Curlander, J. C. and McDonough, R. M.(1991), Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing, John Wiley & Sons, Inc.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Elachi, C.(1988), Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques, IEEE Press, NY..
- [12] Engen, G. and Johnsen, H.(1995), SAR-Ocean Wave Inversion Using Image Cross Spectra, IEEE transaction on antennas and propagation, vol. 33, no. 4.
- [13] Farquharson, G., Juneck, W. N., Ramanathan, A., Frasier, S. J., Tessier, R., McLaughlin, D. J., Sletten, M. A., and Toporkov, J. V.(2004), IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 1, no. 2.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] IFREMER-CERSAT(1999), Off-Line Wind Scatterometer ERS Products: User Manual, Technical Report C2-MUT-W-01-IF, IFREMER-CERSAT.
- [17] Ivanov, A. V.(1982), On the Synthetic Aperture Radar Imaging of Ocean Surface Waves, IEEE Journal of oceanic engineering, vol. OE-7, no. 2.
- [18] Jain, A.(1981), SAR Imaging of Ocean Waves: Theory, IEEE Journal of oceanic engineering, vol. OE-6, no. 4,
- [19] Moore, R. K.(1985), Radar Sensing of the Ocean, IEEE Journal of oceanic engineering, vol. OE-10, no. 2.
- [20] Mouchot, M. -C., Garello, R.(1998), SAR for Oceanography in Henderson, F. M. and Lewis, A. J., Ed., Principles & Application of Imaging Radar, John Wiley & Sons, NY..

- [21] Quilfen, Y., Chapron, B., Elfouhaily, T., Katsaros, K., and Tournadre, J.(1998), Observation of Tropical Cyclones by High-Resolution Scatterometry, *J. of Geophysical Research*, vol. 103, no. C4.
- [22] Raney, R. K.(1980), SAR Response to Partially Coherent Phenomena, *IEEE transaction on antennas and propagation*, vol. AP-28, no. 6.
- [23] Raney, R. K.(1981), Wave Orbital Velocity, Fade and SAR Response to Azimuth Waves, *Journal of oceanic engineering*, vol. OE-6, no. 4.
- [24] SonTek(1998), Acoustic Doppler Profiler Technical Documentation.
- [25] 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,
- [26] Stoffelen, A. and Anderson, D.(1997b), Scatterometer Data Interpretation: Measurement Space and Inversion, *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 14,
- [27] 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.
- [28] 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,
- [29] 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. 1.