

정지궤도 해색탐지체(GOCI) 표층유속 추정을 위한 SeaWiFS 해색자료의 응용

김 응*† · 노영재** · 전동철*

*한국해양연구원 기후연안재해연구부, **충남대학교 해양학과

Application of SeaWiFS Chlorophyll-a Ocean Color Image for estimating Sea Surface Currents from Geostationary Ocean Color Imagery (GOCI) data

Eung Kim*†, Young Jae Ro**, and Dongchull Jeon*

*Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI

**Dept. of Oceanography, Chungnam National University

Abstract : One of the most difficult tasks in measuring oceanic conditions is to produce oceanic current information. In efforts to overcome the difficulties, various attempts have been carried out to estimate the speed and direction of ocean currents by utilizing sequential satellite images. In this study, we have estimated sea surface current vectors to the south of the Korean Peninsula, based on the maximum cross-correlation method by using sequential ocean color images of SeaWiFS chlorophyll-a.

Comparison of surface current vectors estimated by this method with the geostrophic current vectors estimated from satellite altimeter data and *in-situ* ADCP measurements are good in that current speeds are underestimated by about 15% and current directions are show differences of about 36° compared with previous results. The technique of estimating current vectors based on maximum cross-correlation applied on sequential images of SeaWiFS is promising for the future application of GOCI data for the ocean studies.

Key Words : Maximum Cross-Correlation Method, Current Vector, SeaWiFS, Ocean Color, Chlorophyll-a, GOCI data.

요약 : 해양현상을 이해하기 위한 관측분야의 노력 중에서 해류 정보의 생산은 가장 어려운 작업 중의 하나이다. 이를 극복하기 위한 대안으로서 연속 화상 자료로부터 해류벡터를 추정하려는 많은 연구들이 진행되고 있다. 본 연구에서는 한반도 주변의 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) chlorophyll-a 해색 자료와 AVHRR/SST 를 이용하여 연속 화상 사이의 유사한 형태를 추적하는 최대상 관계수법을 사용한 표층 유속 벡터의 추정을 시도하였다. 한국의 남해역에서 적용한 유속 벡터 결과는 해면 고도계를 이용한 지형류, ADCP 관측 결과와 비교하여 유속은 약 15% 정도 작고, 유향은 약 36°의 차이로 균접하여 기존 연구 결과에 비해 양호하게 나타났다. 이는 향후 GOCI 자료의 응용적 측면에서 매우 고무적이다.

접수일(2010년 3월 22일), 수정일(1차 : 2010년 4월 5일, 2차 : 4월 15일), 게재확정일(2010년 4월 15일).

† 교신저자: 김 응(eung@kordi.re.kr)

1. 서 론

최근 우리나라는 한반도 주변의 해양 및 대기를 실시간으로 모니터링하기 위하여 지상 35,786 km의 정지궤도에서 운영할 다목적 통신해양기상위성(COMS, Communication Ocean Meteorological Satellite)의 위성 탑재체와 자료처리 소프트웨어(data processing software)의 개발을 완료하였다. COMS 위성에는 가시광선 파장대에서 해양 및 대기를 공간해상도 500 m × 500 m로 관측할 수 있는 해색 센서(Ocean Color Sensor)가 탑재 된다. 향후, 이 광학 해색센서는 약 1시간의 관측 주기로 주간 시간대(daytime)에 해양의 수질과 생태환경 및 대기 상태를 8 회 반복적으로 관측하게 된다.

기존 위성으로부터 수신된 광학 센서 자료들이 우리나라 주변 해양의 생물학적 특성 연구(김상우 외, 2008; 박지수 외, 2008; Yoo and Park, 2009) 및 대기 중의 황사 모니터링 연구(Sohn and Hwang, 1998; 김영섭 외, 2002; Iino *et al.*, 2006)에 큰 기여를 하고 있으나, 광학 센서에 위해 관측된 해색 자료에는 대기 및 해양의 물리(역학)적 현상에 관련된 정보가 직접적으로 내포되어 있지 않은 단점이 있다. 해색 자료로부터 해양 및 대기의 역학 정보를 얻기 위해서는 단순한 1 차 위성 해색 자료를 역학 방정식이나 통계적 방법으로부터 처리된 2 차 자료에서 추가적인 각종 정보를 추출해야만 한다.

최근에는 해색 자료로부터 해양의 물리적 특성을 이해하기 위한 많은 연구들이 수행중이다. Olson(1986)은 부표(pseudo-lagrangian drifter)의 움직임이 플랑크톤 군집의 표류 패턴 정보를 제공한다고 하였으며, Dzwonkowski and Yan(2005)은 체사피(Chesapeake) 만의 해색 자료로부터 엽록소-a 의 최대 변동치가 발생하는 정점(화소)을 추적하여 식물플랑크톤의 플룸(flume)이 발생하는 해역의 크기와 플룸 해역 면적의 증가율을 계산하였고, Sackmanm and Perry(2006)는 555 nm 파장대의 1 일 간격의 탁도 해색 자료를 가지고 형태추적법(feature tracking method)을 사용하여 대상 해역의 유속과 방향을 추정하였고, Yoo and Park(2009)은 해색 자료의 엽록소-a 최대치를 추적하는 방법으로 연안역에서 용승된 해수의 이동 궤적을 추적하는 연구를 수행하였다.

대기과학에서 황사는 시간 및 거리에 따라 농도의 변화는 있지만 변질되지 않는 기원(source)이 존재(한국과학기술연구원, 1993)한다는 가정하에 표준 등압면상의 바람 자료를 사용하여 공기괴(황사)를 역추적하는 방법(backward lagrangian trajectory)을 사용하여 황사 이동 경로에 대한 연구가 수행되고 있다(한국과학기술연구원, 1993; 기상연구소, 2005). 대기의 황사의 거동과 유사한 특성이 해양의 식물플랑크톤 수평 분포에도 존재한다. 단시간 및 좁은 해역내의 표층의 식물성 플랑크톤의 분포는 피동적인 표류체(심재형, 2003)이므로 수평적인 분포는 해류에 의해 좌우된다고 가정할 수 있고, 따라서 식물성 플랑크톤의 분포를 이용하여 역으로 해양의 수평 유속 추정이 가능하다.

2010년 6월부터 운영되는 정지궤도의 COMS 위성은 해색자료를 500 m의 고해상도로 1 시간 간격으로 생산하기 때문에 표층에서 수십 km, 수 시간 내의 시공간 규모 안에서는 엽록소-a 분포의 변화는 확산의 효과를 무시하면, 해류에 의해 결정 된다. 본 연구에서는 COMS 위성의 해색 자료로부터 추가적인 해양 역학 정보를 얻기 위한 목적으로 해색 위성자료를 이용한 표층 유속 벡터 추정 알고리즘을 개선하고 그 타당성을 연구하고자 하였다.

광학 해색 센서는 해양의 부유퇴적물과 엽록소-a 농도의 수평 분포 자료를 제공한다. 해양의 부유퇴적물의 농도는 육지에서 유입되는 퇴적물의 영향으로 대륙 주변부에서 높고, 원양에서 매우 낮다. 이 특성은 부유퇴적물이 광역의 표층 유속 벡터를 추정하는 데에는 적합하지 않다는 것을 의미한다. 전 해양의 표층에 널리 분포하는 엽록소-a 가 수 시간동안 수평 분포에 대한 보전성을 갖는 경우 고해상도의 엽록소-a 자료로부터 표층유속 벡터의 추정이 가능한지 판단하기 위한 선행 연구로 SeaWiFS 해색 자료의 엽록소-a 를 이용한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 국지적인 해역내의 비보전성 물질의 엽록소-a 자료로부터 표층 유속 벡터를 추정을 위한 기법을 개선 향상시켰다. 본 연구에서는 첫째, 엽록소-a 해색 자료내의 화상 잡음(noise)을 제거하기 위한 화상 처리 알고리즘을 사용하였고, 둘째, 화상 처리된 자료에 개선된 최대상관계수법(MCC, Maximum Cross-Correlation Method)을 적용하여 표층 유속 벡터 추정

방법을 향상시켰다. 이때 상관계수를 계산하는 패턴(pattern)과 서치(search) 화상은 각각 화상 강조 알고리즘을 이용하여 부분 화상 강조를 하는 알고리즘을 추가하였다.셋째, 추정된 유속 벡터를 검증하기 위하여 동일한 유속 벡터 추정 방법을 표층 수온에 적용한 결과, 해면 고도에 의한 지형류, 현장 관측에 의한 ADCP 해류 성분 등과 비교 분석하였다.

2. 연구 자료

표층 유속을 추정하기 위하여 본 연구에서 사용한 자료(Table 1)는 SeaWiFS의 원격탐사반사도(Remote Sensing Reflectance)로부터 계산된 엽록소-a 자료이다.

SeaWiFS는 일반적으로 한국 근해를 오후 시간대에 통과하며, 1 일 동안 약 2 시간 이내의 간격으로 SeaWiFS 센서에 의해 두 종류의 해색 자료가 생성된다. 두 자료 세트의 각각의 궤도에서 반복 관측된 동일 영역은 매우 협소하고, 반복 관측된 영역도 각 궤도의 swath 가장자리에 존재하기 때문에 자료의 질이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 문제점 때문에 본 연구에서 사용한 엽록소-a 자료는 약 24 시간 간격으로 관측된 2003년 4월 15일과 16일 자료를 사용하였다(Fig. 1). 또한 해색 자료에서 추정된 유속의 비교를 위하여 약 12 시간 간격으로 관측된 해양 표층수온 자료를 사용하였다(Fig. 1).

또한, 최대상관계수법에 의한 유속 벡터 추정 결과를 비교 검증하기 위하여 해면고도(Sea Surface Height;

Table 1. Observation times of satellite images by SeaWiFS, NOAA, and altimeter in the marginal seas around Korea

Satellite Image Data				
		Pattern Image	Search Image	SSH data
South Sea	Chl-a	13:02 April 15, 2003	13:40 April 16, 2003	April 16, 2003
	SST	17:38 April 15, 2003	05:02 April 16, 2003	

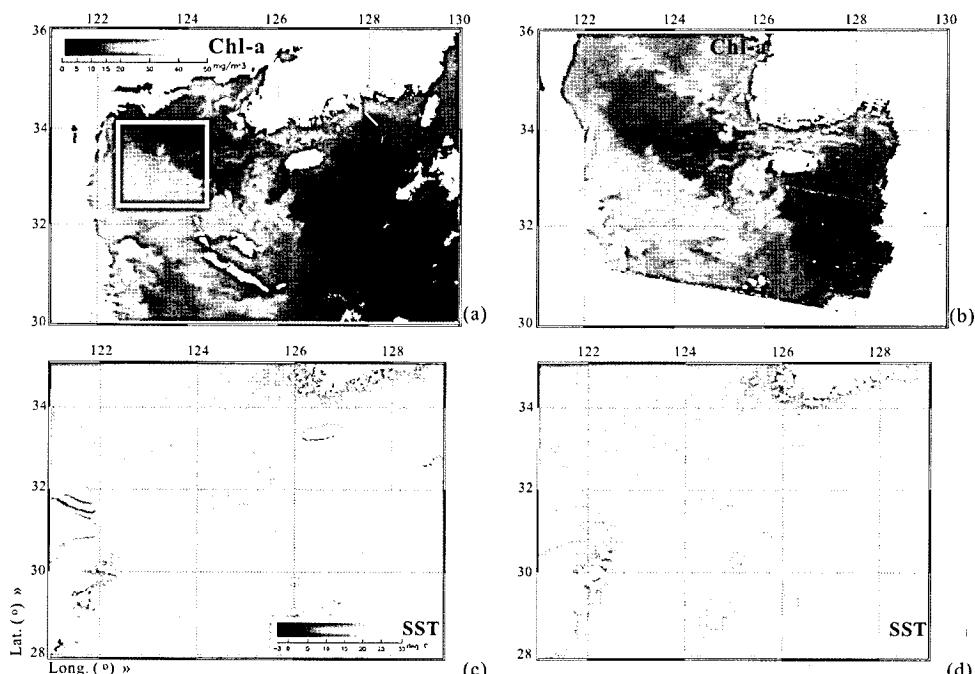


Fig. 1. Chlorophyll-a images by SeaWiFS sensor in ORBVIEW-2, and NOAA-16 AVHRR/SST images used to estimate the ocean surface current vector field. Date of observation on chlorophyll-a image is (a) April 15, 2003, 13:02 and (b) April 16, 2003, 13:40, and AVHRR/SST image is (c) April 15, 2003, 17:38 and (d) April 16, 2003, 05:02, respectively. The box area in (a) is sub-image for image processing test, the white line in (a) is ADCP observation line by NORI in April 2003.

SSH) 자료에 의한 지형류와 현장관측 ADCP 유속 자료를 사용하였다. 표층 지형류 자료는 TOPEX/POSEIDON (T/P), ERS-1/2, Jason-1 과 ENVISAT 위성고도계 등에 의해 관측된 자료를 CLS/CNES (Collecte, Localisation, Satellites /Centre National d' Etudes Spatiales)에서 7 일 주기로 합성하여 지연모드로 계산된 고도자료 (Updated SSH)로부터 계산된 것이다 (Table 1). 이 지형류는 격자 해상도 $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ 를 갖고, 조석 보정(oceanic tide, earth tide, Pole tide), 대기 압 보정, radiometer drift 보정 등의 각종 보정이 이루어진 자료이다(SSALTO/DUACS, 2006). 현장 관측 ADCP 유속은 2003년 4월에 국립해양조사원에서 남해의 여수-TSB 정선에서 관측한 10 m 수심의 해류 결과이다.

3. 해색 자료로부터 유속 추정을 위한 화상 전처리 과정

단순한 화상 자료로부터 해양학적인 2 차 정보의 추출은 원 화상 자료의 질(quality)과 밀접한 관련이 있다. 위성 화상 자료는 위성에 탑재된 센서와 자료의 보정 단계에 의해 이미 정확도와 정밀도가 결정되어 있지만, 해양 관측 및 관측된 자료의 송수신시의 기계적인 문제에 의해 해색 자료에는 누락된 화소(pixel)가 많이 발생하게 되며, 관측된 자료도 구름 및 해무 등의 기상 상태에 의해 오염되기도 한다. 따라서 특정 단위 영역으로 화상을 처리하여 유속 벡터를 추정하기 위해서는 관측된 자료의 질 저하 문제를 해결하는 과정이 매우 중요하다. 엽록소-a 자료의 전처리 과정은 위성 화상 내의 결락 화소를 채워 넣고, 오류 화소점을 제거하여 위성 화상 자료의 질을 향상시킴으로써 표층 유속 벡터의 추정 효율성을 증대시킨다.

SeaWiFS 엽록소-a 해색 자료내의 결락 화소와 오염 화소를 제거하기 위하여 다음의 화상처리 과정을 수행하였다. 첫 번째 단계는 엽록소-a 해색 화상의 결락 화소를 채우는 맵핑 과정이다. 이 자료 처리 단계에서는 결락 화소점을 맵핑하기 위한 최적의 단위 영역을 찾기 위하여 다양한 단위 소영역(화소 개수가 각각 3×3 , 5×5 , 7×7 , 9×9)을 설정하여 자료 맵핑 정도를 실험하였

다. 이 결과 단위 영역이 좁을수록 결락화소가 맵핑되는 화소점이 적어지고, 단위영역이 증가할수록 자료가 존재하지 않은 넓은 영역도 맵핑이 되는 현상이 나타났다. 이러한 특성을 고려하여 7×7 개의 단위 화소 영역 내에 받아들일 만한 (good) 자료가 전체 단위 화소의 약 85% (42 개) 이상 존재할 때, 이 값들의 평균값을 계산하여 맵핑하는 방법을 사용하였다.

두 번째 해색 자료 처리 단계는 화상의 구조가 크게 변화하지 않는 범위 내에서 화상 자료 사이의 수평 형태의 일치성을 높이기 위하여 화상내의 잡음(noise)을 제거하는 평활화(smoothing) 과정이다. 이동 평균하는 소영역의 크기(각 3×3 , 5×5 , 7×7 개의 화소)를 변경하면서 실험을 한 결과, 소영역의 크기가 커질수록 자료의 평활화 강도가 증가하면서 해색 자료의 미세한 수평적 구조가 사라지는 현상이 나타났다. 본 연구에서는 원래 화상의 수평적인 형태를 유지하면서 화상내의 잡음만을 효율적으로 제거할 수 있는 최소 (3×3) 화소 단위로 이동 평균하는 자료 평활화 방법을 적용하였다. 이 두 화상 처리 과정을 유속 벡터를 추정하기 전에 pattern 과 search 화상에 모두 적용하여 영상 자료의 질을 향상시켰다.

SeaWiFS 엽록소-a 해색 화상 자료에 대한 화상 전처리 알고리즘의 효율성을 검증하였다. 이것을 위하여 Fig. 1(a)에 표시된 영역의 엽록소-a 의 화상 자료(Fig. 2(a))에서 전체 자료의 약 5%에 해당하는 임의의 위치에 랜덤함수(random function)를 사용하여 결락 화소를 생성한 화상 자료를 만든 후(Fig. 2(b)), 화상 처리 알고리즘을 이용하여 결락 화소를 복원하여 1 단계 처리 영상과 2 단계까지의 처리 해색 자료 영상을 각각 Fig. 2(c) 와 Fig. 2(d)에 나타내었다. 2003년 4월 15일의 SeaWiFS 해색자료의 분석 해역(151×151 개의 화소)에서 엽록소-a 의 평균값은 2.103 mg/m^3 , 분산은 2.078, 왜도(skewness)는 0.708, 그리고 첨도(kurtosis)는 0.037 이다. 화상처리 1 단계에서 결락 화소가 맵핑된 후(Fig. 2(c))의 통계량은 원 자료와 비슷한 평균값 2.103 mg/m^3 , 분산 2.072, 왜도 0.701, 첨도 0.018 이고, 결락 화소를 맵핑하고 평활화 과정을 수행한 경우 (Fig. 2(d))의 엽록소-a 해색 자료에서는 평균 2.103 mg/m^3 , 분산 2.015, 왜도 0.623, 첨도 -0.262 이다. 이 결과는 원 자료의 통계 결과와 유사하다. Fig. 2에 보

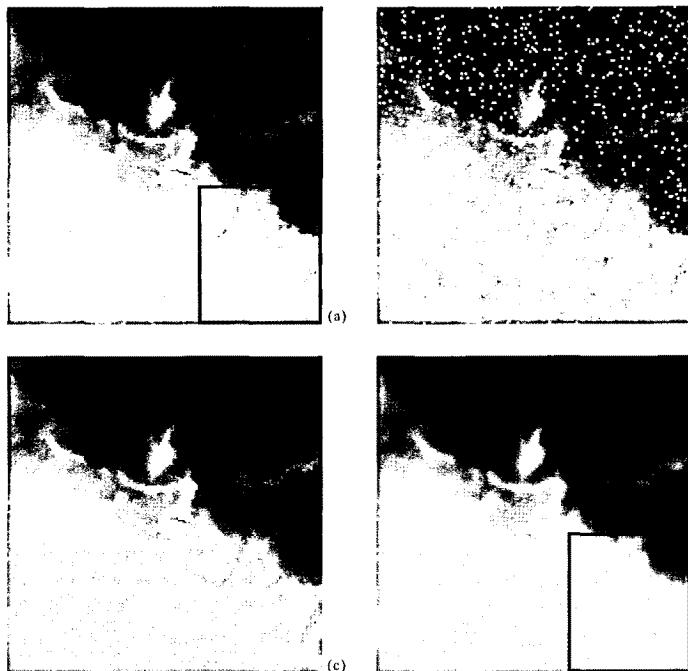


Fig. 2. Example of image processing about chlorophyll-a image on April 15, 2003, 13:02. Target is box image in Fig. 1(a). (a) chlorophyll-a raw image, (b) image included gappy points using random function, (c) image filled gappy points by average method about near good data, and (d) image removed noise by 3 × 3 pixels smoothing method.

이는 것처럼, 결락 자료의 맵핑이 이루어진 후 통계적으로 자료의 질 변화는 거의 발생하지 않으며, 평활화가 이루어진 후(Fig. 2(d))에도 원 자료와 비슷한 평균값과 분산을 가지고 자료의 구조를 유지하면서 평균값을 중심으로 완만하게 분포하는 것으로 나타났으며, 또한 Fig. 2(a)의 우측 하단에 존재하던 스파크(spark) 화소들이 2 단계 영상 처리를 통하여 Fig. 2(d)에서는 사라졌다.

4. 표층 유속 추정 알고리즘

연속된 위성 화상 자료로부터 표층 유속 벡터는 열보전방정식 및 통계적 상관성을 이용하여 계산할 수 있다. 표층 유속 벡터를 계산하기 위하여 기존 연구에서 많이 사용한 방법은 최대상관계수법(Emery et al., 1986; 김응, 노영재, 2000; Barton, 2002), 형태추적법(La Violette, 1984; Svejkovsky, 1988; Ro et al., 1997), 역행렬법(Kelly, 1989; Kelly and Strub, 1992; Lee et

al., 1995)으로 크게 세가지로 대별된다.

이들 표층 유속 벡터 추정 방법 중에서 해양의 비보존성 물질을 대상으로 적용이 가능하고, 화상 분석자에 상관없이 객관적 결과를 얻을 수 있는 기술은 최대상관계수법이다. 또한 향후 COMS 위성으로부터 자료 취득과 동시에 유속 추정 자동화를 고려하여 본 연구에서는 SeaWiFS 해색의 엽록소-a 자료를 이용한 최대상관계수법의 적용 타당성을 연구하였다.

최대상관계수법의 이론적인 방법은 다음과 같다. 연속 화상에서 하나의 유속 벡터를 계산하기 위하여 Fig. 3의 흰테두리 상자와 같은 영역 창(window)을 시간 간격을 갖는 두 화상 사이에서 선택하고, 시간상 앞에 관측된 화상(T1)에서는 유속 벡터를 계산하기 위한 기준단위(패턴타일 pattern tile; P)를 설정하고, 뒤에 관측된 화상(T2) 영역창 내에서는 패턴타일과 같은 크기의 여러 서치타일(search tile; sS)을 설정하여 두 영역 사이의 상관계수를 계산하여 패턴타일에 대하여 상관계수가 최대로 나타나는 서치타일의 위치를 찾아 기준 패턴타일이 이곳으로 움직였다고 가정하는 것이다(Fig. 3의 흰

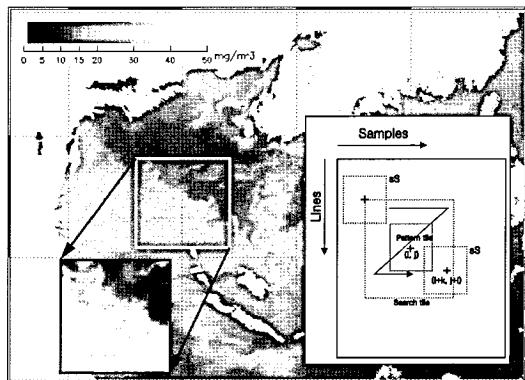


Fig. 3. Pattern-matching correlation geometry. Pattern tile is shifted by lag (i, j) and correlated with corresponding section of search tile (sS) to produce correlation value $r(i, j)$. Search tile to produce correlation value $r(k, l)$. Partially enhanced image is used to calculate cross-correlation.

사각형). 이 패턴타일과 서치타일 사이의 상관행렬은 다음의 식(Emery *et al.*, 1986; 김응, 노영재, 2000)으로 표현이 된다.

$$r_{sp}(k, l) = \frac{\sum \sum [sS(i+k, j+l) - \eta_{ss}(k, l)][P(i, j) - \eta_p]}{\sqrt{[\sum \sum [sS(i+k, j+l) - \eta_{ss}(k, l)]^2 \sum \sum [P(i, j) - \eta_p]^2]}}$$

여기에서 $P(i, j)$ 는 패턴타일, $sS(i, j)$ 은 서치타일이라고, 패턴타일은 첫 번째 화상(T1)의 영역창의 중심에 위치한다(Fig. 2). 단, $\eta_{ss}(k, l)$ 은 $P(i, j)$ 와 같은 크기의 배열을 갖는 서치타일(sS)내의 평균값이고, η_p 는 패턴타일의 평균값이다. k 와 l 은 서치타일 $sS(i, j)$ 가 포함되어 있는 T2 화상의 영역 창(window)내에서 변화하는 위치 인덱스 값이다. T2 화상의 영역창내에서 서치타일이 이동하면서 패턴타일과의 상관계수를 연속적으로 계산하면서, T1과 T2 화상에서 i, j 을 변화시켜 전체 화상에 대한 공간 유속 벡터장을 계산하게 된다.

본 연구에서는 최대상관계수법을 사용하여 패턴타일과 서치타일로부터 유속 벡터를 추정하는 알고리즘은 해색 화상을 부분적으로 강조(enhancement)하는 화상 강조 알고리즘을 추가하였다. 화상 강조 알고리즘은 하나의 유속 벡터를 추정하기 위하여 이용되는 T1, T2 화상내의 동일한 크기의 두 영역창(window)에 대하여 적용되며, 화상 강조 후에 표층 유속 벡터 추정 알고리즘을 적용하여 유속 벡터를 계산한다. 이 과정이 전체 화상에 대하여 반복적으로 적용된다. 이때 사용한 부분 화

상 강조 알고리즘은 화상 T1, T2 영역창(window) 내의 업록소-a 의 자료로부터 최소값과 최대값을 계산한 후, 최소값은 '0'으로 최대값은 '255'로 선형적으로 증감시킨 후, 이 증감된 값을 다시 1/3 제곱승 하여 화상의 공간적 구조를 강조하게 된다. 이 알고리즘이 화상에 적용되면 화상 자료의 수치가 낮은 해역에서 작은 수치를 증대시키는 효과가 있기 때문에 업록소-a 가 낮은 해역에서 업록소-a의 수평적 분포 형태를 뚜렷하게 강조하게 되어 같은 공간 구조를 찾는데 유리하다(Fig. 3의 검정 사각형). 이 방법이 적용 가능한 것은 최대상관계수법에서 추적(tracking)하는 것이 자료(농도)값의 크기가 아닌 공간 패턴이기 때문이다.

SeaWiFS 해색 화상 처리에 따른 유속 벡터의 추정 결과를 분석하기 위하여 원 해색 화상 자료(Fig. 4a), 화상 처리만 된 해색 자료(Fig. 4b), 그리고 화상 처리와 화상 강조가 이루어진 해색 자료(Fig. 4c)를 가지고 탐색 영역창(window)의 크기 65 km × 65 km, 각각의 pattern tile과 search tile 의 크기 38 km × 38 km, 최대상관계수의 하한 임계값 0.7 의 동일한 조건하에서 유속 벡터를 추정하였다(Fig. 4). 이때, 탐색 영역창의 크기는 우리나라 주변에서 발생할 수 있는 해류의 세기를 고려하여 결정하였으며, 또한 영역창(window) 내의 적절한 타일(tile)의 크기를 찾기 위해 타일의 크기를 변화시키면서 유속 벡터 재현에 대한 민감도 검사를 실시하였다. 이 결과 본 연구 해역에서는 타일의 중심으로부터 약 19 km 정도의 반경을 갖는 38 km × 38 km 크기의 타일에서 근접 유속 벡터와 편차가 줄어들면서 일정한 유속 구조가 계산되는 것으로 나타났다.

화상 처리에 따라 추정되어진 표층 유속 벡터들 사이에는 많은 차이가 있다. Fig. 4의 회색 상자 내에서 계산되어진 유속 벡터를 비교해 보면, 원자료에서 계산된 유속 벡터장에 비해 원자료의 결락 자료를 맵핑하고 평활화 처리 과정이 추가되면서 최대상관계수 0.7 이상을 갖는 유속 벡터의 추정 개수가 증가하고(Fig. 4b), 여기에 화상 강조 알고리즘이 추가되면서 계산되어지는 유속 벡터의 개수의 추가적인 증가뿐 아니라, 추정되어지는 유속 벡터들내에 오류 벡터가 감소하는 효과가 나타났다(Fig. 4c). 따라서 화상처리 및 화상 강조 알고리즘이 유속 벡터 계산에 질적 향상이 있는 것으로 확인되었다.

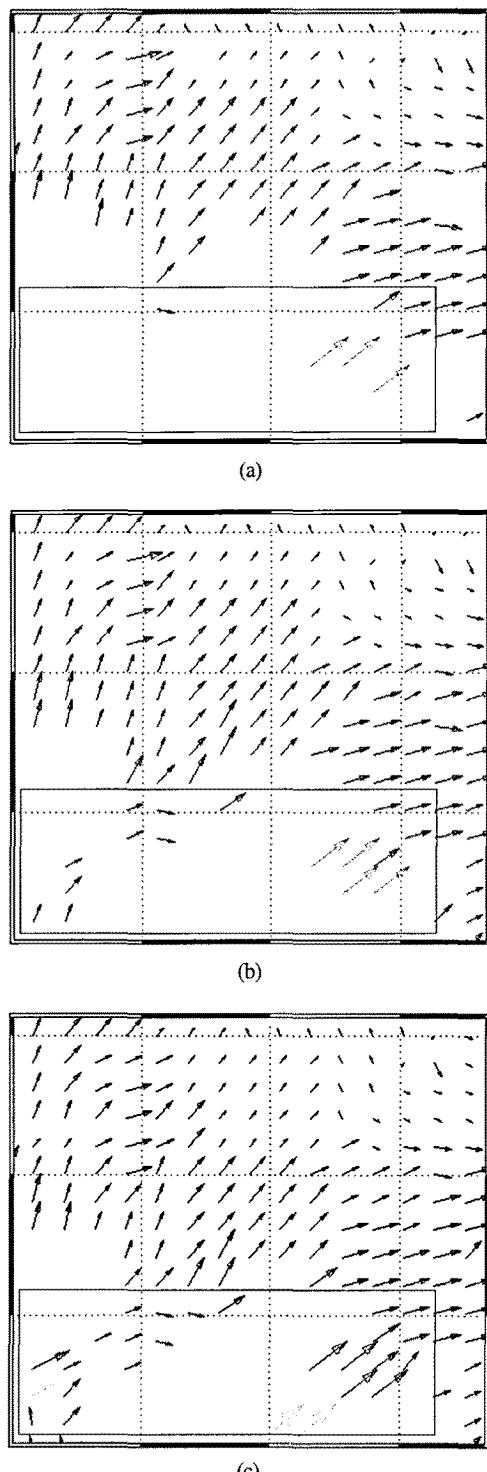


Fig. 4. Results of estimated ocean current vectors from (a) raw image, (b) processed data after image processing on raw data, and (c) processed data after image processing and image enhancement algorithm on raw data.

5. SeaWiFS 해색의 엽록소- α 자료에 의해 추정된 표층 해류의 비교 검증

해양의 비보전성 물질의 생물량인 SeaWiFS 엽록소- α 해색 자료를 사용하여 계산된 표층 유속 벡터를 보전성의 표층 수온 위성 자료와 해면고도로부터 계산된 유속 벡터 그리고 현장 ADCP 관측 결과와 비교 검증 하였다. 표층 유속 벡터 계산에 사용된 위성 자료들은 Table 1에 나타낸 것처럼 같은 시기의 자료들이며, 엽록소- α 해색과 표층 수온에 대해서는 동일한 최대상 관계수법을 사용하여 유속 벡터를 계산하였다. 이때 엽록소- α 해색 자료간의 시간차는 약 24 시간이고, 표층 수온 자료에서는 약 12 시간이다. 그리고 해면고도로부터 계산된 지형류는 약 1 주일 동안의 해면고도를 객관적 적합보간법을 통해 격자화된 자료로부터 계산된 것이다. 위성 자료로부터 표층 유속 벡터를 추정하는 연구는 특정 지점의 유속값을 얻기 위한 것보다 광역의 공간적 유속 구조를 이해하는데 목적이 있다. 본 연구에서는 연구 결과를 비교 검증하기 위하여 각각의 자료로부터 계산된 유속 벡터들의 해역별 평균 유속 벡터장을 사용하였다.

2003년 4월의 남해 및 서해 역에서 계산된 유속 벡터 결과들을 보면, 해색으로부터 추정된 유속 벡터의 분포 구조(Fig. 5(a)), SST로부터 추정된 유속장(Fig. 5(b)), 그리고 해면고도로부터 계산된 유속 벡터(Fig. 5(c))들이 공간적으로 유사한 형태를 보이고 있다. 이 유속 결과들에는 공통적으로 제주도 남부 해역에서 쿠로시오의 북상, 양자강으로부터 유입된 담수가 남해 및 서해로 확산되는 경로, 그리고 남해의 제주해협과 대한해협을 통해 동해 내부로 유입되는 해류들이 표현되어 있다. 엽록소- α 해색과 표층수온 위성 화상으로부터 계산된 유속장은 공간적으로 일정한 방향으로 움직이는 해류가 뚜렷이 보이는 반면, 해면고도로부터 계산된 지형류의 표층 유속은 중규모(meso-scale)의 소용돌이 흐름이 나타나는 것이 특징이다. 이 표층 유속장을 정량적으로 비교하기 위하여, 유속 벡터가 추정된 해역들 중에서 국지적으로 5개 해역을 선정하여 해역의 평균 유속과 유향을 계산하였다(Table 2).

국립해양조사원에 의해 현장 관측된 ADCP 해류 결과가 존재하는 제주해협 동부의 A1 해역은 연중 동해로

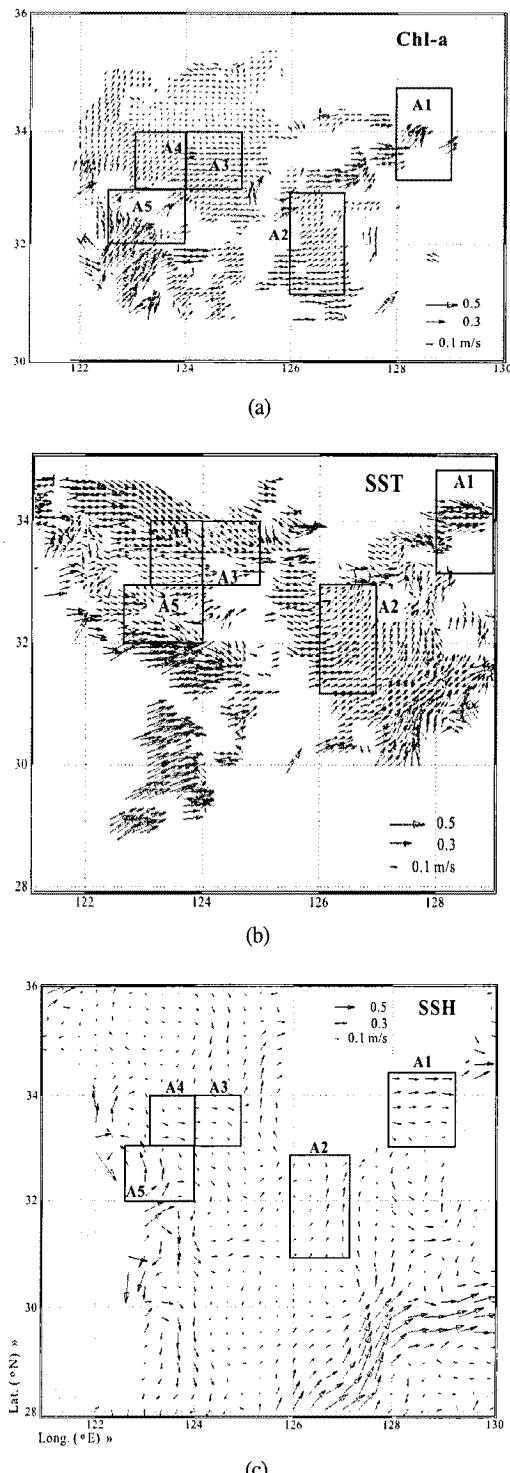


Fig. 5. Estimated ocean current vectors using maximum cross-correlation method by (a) SeaWiFS chlorophyll-a images and (b) AVHRR/SST images, and Geostrophic current vectors calculated from sea surface heights by AVISO.

유입되는 대마난류가 존재하는 곳이다. 이 해역에서 ADCP 현장 관측 결과는 유속이 약 0.2 m/s이고 유향은 약 57°이다. 최대상관계수법에 의해 계산된 표층 유속은 SeaWiFS 해색 자료에서 평균 유속 0.23 m/sec이며 유향 44°이고, 표층 수온으로부터 추정된 결과에서 유속 0.18 m/sec 유향 85°이다. 해면고도로부터 계산된 지형류에서는 평균 유속 0.19 m/sec 유향 92°로 나타났다. 수로의 특징을 보이는 A1 해역은 모든 해류 벡터장에서 약 0.2 m/sec로 북동진하는 대마난류가 존재하고, 상대적으로 해색으로부터 계산된 표층 유속 결과가 현장 관측과 유사하다.

제주도 남부에 존재하는 A2 해역은 쿠로시오 해류로부터 분지되어진 대마난류의 복상이 나타나는 곳이다. 이 해역에서는 최대상관계수법에 의해 계산된 해색과 표층 수온의 결과 그리고 해면고도의 지형류에서 모두 약 0.1 m/sec 유속과 유향 약 50°로 북동향하는 해류가 존재한다.

다른 해역과 비교해 SeaWiFS 엽록소-a 수치가 상대적으로 낮은 곳은 A3 와 A4 해역이다. 이 A3 해역의 해색 화상 자료로부터 추정한 유속 벡터는 표층 수온으로부터 계산한 결과에 비해 유속이 약 1/2 정도이다. 그러나 유향은 표층수온의 유속 벡터와 약 17° 차로 비교적 같은 방향성을 갖는다. 이 결과는 지형류와의 비교에서도 유사하다. A4 해역에서는 표층 수온과 해면고도로부터 계산된 유속 벡터가 유사성을 보인 반면, 엽록소-a로부터 계산된 유속 벡터는 두 결과와 차이가 있다.

양자강 인접 해역에 존재하는 A5 해역은 담수의 영향으로 본 연구해역에서 엽록소-a 수치가 가장 높은 곳이다. 엽록소-a 해색 화상에서 추정된 유속은 공간적으로 약 0.16 m/sec 유향은 41°이다. 이 결과는 지형류 유속 0.2 m/sec 유향 57°와 유사하다. 그러나 표층 수온의 결과와는 유향에서 약 55° 정도의 차가 있다.

해역 평균 유속과 유향은 엽록소-a 가 낮은 해역이외에서는 각각의 자료가 갖는 다른 특성에도 불구하고 유속 구조가 비교적 같다. 전체적인 유속 벡터 사이의 각각의 오차를 보면, 해색 자료의 결과가 표층 수온에서 계산된 유속 성분에 비해 약 14% 정도 작고 두 유향 성분 사이에는 약 36°의 차이가 있으며, 해면고도 지형류에 대해서는 유속이 약 16% 정도 작고 두 유향 성분 사이에는 약 35°의 차이가 있다. 그리고 표층수온의 유속

Table 2. Comparison between the estimated current vectors by three satellite data and observed current vectors by ADCP

	A1		A2		A3		A4		A5	
	Vel.(m/s)	Dir.(°)	Vel	Dir	Vel	Dir	Vel	Dir	Vel	Dir
Ch-a	0.23	44	0.10	63	0.07	99	0.07	49	0.16	41
SST	0.18	85	0.12	52	0.16	116	0.13	106	0.13	96
SSH	0.19	92	0.11	35	0.10	113	0.12	121	0.20	57
ADCP	0.20	57	-	-	-	-	-	-	-	-

성분을 해면고도의 지형류와 비교하였을 때에는 유속이 약 7% 정도 크고 유향은 약 15°의 차이가 있다. 현장 관측은 유속계 등에 의해 특정 위치에서 순간의 해류 정보 획득만 가능하기 때문에 동시에 매우 많은 위치를 대상으로 유속 측정 장비를 설치하지 않는 한 광역의 공간 해류 구조 파악은 현실적으로 불가능하다. 위성 자료로부터 계산된 해류 정보의 장점은 광역성이므로 본 연구의 결과는 공간적인 해류 구조를 이해한다는 측면에서 타당하다.

해양 상층 대기의 구름이나 해무 및 관측 센서의 개별적인 특성에 의해서 단일 화상 자료로부터 광역의 유속 벡터들을 계산하는 것은 한계가 있다. 본 연구에서는 이 단점을 해결하기 위한 방안으로 각각의 위성 자료로부터 계산된 유속 벡터들을 합성하였다(Fig. 6). 각각의 유속 벡터를 합성한 결과는 개별적 결과에서 파악이 어려웠던 동중국해의 일반적인 표층 해류 구조를 광역적

으로 잘 재현하였다. Fig. 5의 결과에서 부분적으로 나타난 양자강 담수 유출수의 확산과, 대마난류와 쿠로시오의 이동 경로 등이 합성 유속 벡터 맵에서는 공간적으로 연속성을 가지는 해류 구조로 나타난다. 이 원인은 Wilkin et al.(2002) 등이 논의한 것처럼, 해면고도 자료는 육지 근접 연안 해역에서 유속 벡터를 계산할 수 없으나, 해색 자료와 표층 수온 자료에서는 최대상관계수법을 통하여 육지 인접 해역에서도 유속 벡터의 추정이 가능하기 때문이다. 따라서 광역의 표층 유속 벡터장을 이해하는 것은 단일 위성 자료로부터 계산된 유속 벡터를 사용하는 것보다 합성된 유속 벡터장을 이용하는 것이 전체적인 해류 구조를 이해하는데 더 유리한 것으로 판단된다.

6. 결론 및 토의

본 연구에서는 통신해양기상 위성의 해양 자료를 활용하기 위한 선행 연구로 엽록소-a를 대상으로 해양의 주요 물리적 현상 중에 하나인 표층 유속을 계산하기 위하여, 광학센서의 해색 자료와 적외선 및 근적외선 센서에 의한 표층 수온에 모두 적용이 가능한 최대상관계수법을 이용한 연구를 수행하였다.

최대상관계수법을 적용하여 표층 유속 벡터를 추정 할 수 있는 위성 자료로는 보전적이고, 일일 주기의 변화가 없는 비생물적인 성분(Garcia and Robinson, 1989)들의 표층수온이나 부유퇴적물이 유리하고, 이 위성 자료들이 약 4 시간 내지 12 시간의 간격을 가지는 것이 적합하다(Kelly and Strub, 1992)고 하였다. 해양에서 일반적인 식물플랑크톤의 침강 속도는 1 m/day 넘지 않고(심재형, 2003), 위성에서 관측된 해색 자료는 소광계수의 역수에 해당하는 깊이의 정보(심재형, 2003)를 포함하고 있다(투명도가 10 m 일 때 7 m). 이

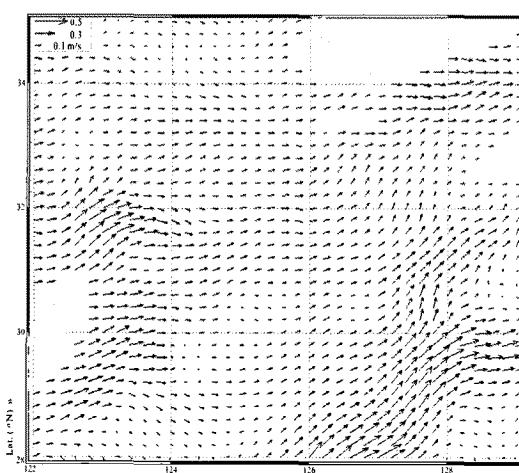


Fig. 6. Horizontal distributions of combined sea surface currents in the East China Sea on April 15, 2003. Used data are the MCC vector field from chlorophyll-a ocean color, the MCC vector field from AVHRR/SST, and geostrophic current vectors from altimeter SSH data.

특성으로 인해 식물플랑크톤의 성장을 나타내는 해색 구조는 해수 유동 구조와 연관이 있고(Yentsch, 1982), 표층 식물플랑크톤 생체량이 해류의 추적자(tracer)로 이용될 수 있음을 기존 연구자들(Moreno-Ostos et al., 2006; Garcia-Gorriz and Stips, 2008)에 의해 제안되었다. 향후 공간해상도 500 m의 고해상도로 주간에 1시간의 관측 주기를 갖는 통신해양기상위성의 해색 자료을 이용하여 해류 벡터 정보를 추정하는 경우, 비록 식물플랑크톤이 1~2 일의 수명을 갖는 비보존성 물질이기는 하나, 단시간 내의 변동성을 무시하고, 해류에 의해 분포가 결정된다고 가정할 때, 본 연구에서 적용한 유속 벡터 추정 기법의 활용성은 높아질 수 있다. 또한 비보전성 해색 자료로부터 표층 유속을 추정하기 위하여 최대상관계수법을 적용한 것은 처음으로 시도된 것으로써 그 의미가 매우 크다.

해양의 위성 자료는 관측 및 수신 상태나 기상 여건 등에 의해 화상 내에 다양한 오류 값들이 내포되어 있다. 본 연구처럼 특정 단위 영역에서 자료를 분석하는 연구에서는 오류의 제거가 반드시 필요하다. 오류 화소 점을 제거하기 위하여 본 연구에서는 위성 화상의 결락 자료의 주변 자료로부터 평균값을 계산하여 결락 화소를 맵핑하고, 화상의 잡음을 제거하기 위하여 3×3 화소의 평활화 방법을 적용하였다. 이러한 화상처리 과정을 통하여 SeaWiFS 엽록소-a 해색 자료로부터 추정되어지는 표층 유속 벡터의 질이 향상되었다. 이것은 상관 계수 계산에 영향을 미친 bad value 들이 제거되거나 평활화 되었기 때문이다.

해색 자료로부터 추정된 표층 유속 벡터를 동일한 알고리즘을 표층 수온에 적용하여 얻은 유속 벡터와 해면 고도로부터 계산된 지형류 그리고 현장 관측 유속과 비교 분석하였다. 표층 수온으로부터 계산된 유향유속은 해면고도의 지형류와 같은 크기의 유속 성분으로 나타났고, SeaWiFS 엽록소-a 해색 자료의 유속 성분은 두 대조 유속 성분에 비해 유속은 약 15% 정도 작고, 유향은 36° 의 차이가 있다. 이 차이는 현장 관측 유속 성분들과 위성 자료로부터 유속 성분을 추정한 Kelly and Strub(1992), Lee et al.(1995), 그리고 김응과 노영재(2000) 등의 연구에서 나타난 약 35% 유속 오차와 약 50° 의 유향 오차 등과 비교해 좋은 결과이다. COMS 위성에 탑재된 적외선 센서는 해상도가 4 km이며, 이

는 NOAA 위성의 AVHRR 해상도 1.1 km 보다 저해상도이다. 고해상도의 1 시간 관측 주기를 갖는 표층 수온 자료를 이용할 수 없는 현 시점에서는 고해상도의 엽록소-a 자료가 광역 유속 정보를 얻을 수 있는 좋은 대안이 될 수 있다.

SeaWiFS 엽록소-a의 비보전성 물질을 대상으로 우리나라의 남서해역에서 표층 유속을 계산한 본 연구는 타 결과와 상당히 유사한 유속의 공간 분포 구조를 보였다. 이유는 우리나라 주변에 서식하는 식물플랑크톤의 대부분이 수명이 짧은 규조류와 와편모조류 등으로 이루어져 각각의 개체 변동이 발생을 하지만, 군집의 공간적 분포 양상은 유지되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 통신해양기상위성의 고해상도 엽록소-a 해색 자료가 육지 주변에서 높게 나타나는 부유퇴적물에 비해 표층 유속을 추정하는데 유용한 자료로 활용 가능하다는 것이 본 연구를 통하여 확인되었다.

2010년 6월 이후, 통신해양기상위성의 해양관측탐재체로부터 생산되는 엽록소-a 해색 자료가 주간 시간대에 1시간 주기의 정밀한 고해상도로 사용이 가능하게 되면, 우리나라 주변의 표층 해류 변동 상황의 실시간 감시, 하계에 빈번히 발생하는 적조의 실시간 확산/이동 경로 추적, 그리고 일차생산 bloom 해역의 공간적인 변동 등을 추적 또는 예측하는데 본 연구에서 개발된 표층 유속 벡터 추정 알고리즘이 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 한국해양연구원의 ‘정지궤도 해양위성 활용연구지원사업(PM55660)’의 지원과 ‘북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구(PE98445)’의 일부 지원으로 수행되었으며, 본 논문에 대한 세심한 교정을 해주신 심사위원 분들께 감사드립니다.

참고문헌

기상연구소, 2005. 기상지진기술개발사업-황사감시 및 예측기술개발(I), 기상청, p229.

- 김상우, 임진숙, 장이현, 2008. 해색영상을 이용한 동종국해 북부해역 하계 클로로필 a의 시공간 분포, 한국환경과학회지, 17(1): 85-95.
- 김영섭, 박경원, 서애숙, 2002. KOMPSAT OSMI 자료를 이용한 황사탐지, 대한원격탐사학회지, 18(4): 201-207.
- 김 응, 노영재, 2000. 연속 위성 화상 자료상의 향상된 형태추적법을 이용한 유속추정기법, 대한원격탐사학회지, 16(3): 199-209.
- 박지수, 석문식, 윤석, 유신재, 2008. 북서태평양의 표층엽록소 변동성, Ocean and Polar Research, 30(3): 277-287.
- 심재형, 2003. 플랑크톤 생태학. 서울대학교 출판부, pp. 1-150.
- 한국과학기술연구원, 1993. 인공위성에 의한 황사이동 추적 및 청정대기 감시 체제 구축에 관한 연구(I). 과학기술처, p98.
- Barton I. J., 2002. Ocean currents from successive satellite images: The reciprocal filtering technique, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 19: 1677-1689.
- Dzwonkowski N. and X. H. Yan, 2005. Tracking of a Chesapeake Bay estuarine outflow plume with satellite-based ocean color data, *Continental Shelf Research*, 25: 1942-1958.
- Emery W. J., A. C. Thomas, M. J. Collins, W. R. Crawford and D. L. Mackas, 1986. An Objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images, *J. Geophys. Res.*, 91(C11): 12865-12878.
- Garcia C. A. E. and I. S. Robison, 1989. Sea surface velocities in shallow seas extracted from sequential coastal zone color scanner satellite data, *J. Geophys. Res.*, 94(C9): 12681-12691.
- Garcia-Gorriz E. and A. K. Stips, 2008. Multi-annual model runs for the Mediterranean Sea: the Aegean Sea. JRC EUR Report 23218 EN.
- Iino N., K. Kinoshita, A. C. Tupper, and T. Yano, 2006. Detection of Asian dust aerosols using meteorological satellite data and suspended particulate matter concentrations. *Atmospheric environment*, 38(40): 6999-7008.
- Kelly K. A., 1989. An inverse model for near-surface velocity from infrared images, *J. Phys. Oceanogr.*, 19(12): 1845-1864.
- Kelly K. A. and P. T. Strub, 1992. Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coastal transition zone, *J. Geophys. Res.*, 97(C6): 9653-9668.
- La Violette P. E., 1984. The advection of submesoscale thermal features in the Alboran Sea Gyre, *J. Phys. Oceanogr.*, 14: 550-565.
- Lee T. S., J. Y. Chung and H. W. Kang, 1995. Determination of weighting factor in the inverse model for estimating surface velocity from AVHRR/SST data, *J. of the Korean Society of Oceanogr.*, 30(6): 543-549.
- Moreno-Ostos E., L. Cruz-Pizarro, A. Basanta-Alv?as, C. Escot and D. G. George, 2006. Algae in the motion: Spatial distribution of phytoplankton in thermally stratified reservoirs, *Limnetica*, 25(1-2): 205-216.
- Olson D. B., 1986. Transition zones and faunal boundaries in relationship to physical properties of the ocean. In: Pierrot-Bulls, A. C., van der Spoel, S., Zahuranec, B. J. and Johnson, R. K. (eds), *Pelagic Biogeography*, UNESCO Technical Papers in Marine Sciences 49, UNESCO, Paris, pp. 219-229.
- Ro Y. J., A. Alexanin and A. Kazansky, 1997. Synoptic approach to estimation of sea surface current fields from sequential satellite image : Improved technique and validation study, *J. of the Korean Soc. of Remote Sensing*, 13(3): 203-222.
- Sackmann B. and M. J. Perry, 2006. Ocean color observations of a surface water transport event: Implications for *Pseudo-nitzschia* on the Washington coast, *Harmful Algae*, 5: 608-619.

- Sohn B. J. and S. H. Hwang, 1998. Identifying yellow sand from the ocean color sensor SeaWiFS measurements, *J. of the Korean Society of Remote Sensing*, 14(4): 366-375.
- SSALTO/DUACS, 2006. SSALTO/DUACS User Handbook. CLS-DOS-NT-06.034, CLS Ramonville St Agne, 54p.
- Svejkovsky J., 1988. Sea surface flow estimation from advanced very high resolution radiometer and coastal zone color scanner satellite imagery : a verification study, *J. Geophys. Res.*, 93(C6): 6735-6743.
- Yentsch C. S., 1982. Satellite observation of phytoplankton distribution associated with large scale oceanic circulation, *NAFO Sci. Coun. Studies*, 4: 53-59.
- Yoo S. J. and J. S. Park, 2009. Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan?, *Journal of marine systems*, 78(2): 301-315.
- Wilkin J. L., M. M. Bowen, and W. J. Emery, 2002. Mapping mesoscale currents by optimal interpolation of satellite radiometer and altimeter data, *Ocean Dynamics*, 52: 95-103.