해색위성 원격탐사를 이용한 부유성 녹조 모니터링

이권호[1※] · 이소현[2]

Monitoring of Floating Green Algae Using Ocean Color Satellite Remote Sensing

Kwon-Ho LEE[1※] · So-Hyun LEE[2]

요 약

최근 해양에서 부유성 녹조류(Floating Green Algae)의 확산이 보고되고 있으나, 기존의 현지 관측이나 실험실에서의 화학적 분석으로는 정확하고 주기적인 광역 감시에 한계가 있다. 이에 반해 녹조에 포함된 엽록소의 광학특성에 기인한 분광 반사도 측정은 부유성 녹조에 대한 정보를 비교적 빠르고 정확하게 획득하는 것이 가능하다. 본 연구의 목적은 최근 서해에서 발생한 부유성 녹조류의 분광 반사도 특성을 알아보고, 인공위성 영상으로부터 부유성 녹조를 탐지하기 위한 방법으로서 비교적 간단한 파장별 반사도 비율을 이용한 부유성 녹조 지수(Floating Green Alage Index; FGAI)를 개발하는 것이다. 500m 공간 해상도를 가지는 MODIS와 천리안 GOCI 영상자료를 이용하여 서해안의 녹조 현상이 발생하였던 기간을 대상으로 적색 밴드(660nm)와 근적외 밴드(860nm)의 비를 이용한 부유성 녹조지수를 분석한 결과는 녹조 현상에 대한 조류의 탐지 가능성을 증명하였다. 특히, 매 시간별 GOCI 관측 자료는 저궤도 위성보다 상세한 녹조의 감시가 가능함을 알 수 있었다.

주요어 : 조류, 클로로필, 인공위성, 부유성 녹조 지수

ABSTRACT

Recently, floating green algae (FGA) in open oceans and coastal waters have been reported over wide area, yet accurate detection of these using traditional ground based measurement and chemical analysis in the laboratory has been difficult or even impossible due to the lack of spatial resolution, coverage, and revisit frequency. In contrast, spectral reflectance measurement makes it possible to quickly assess the chlorophyll content in green algae. Our objectives are to investigate the spectral

2012년 7월 22일 접수 Received on July 22, 2012 / 2012년 9월 10일 수정 Revised on September 10, 2012 / 2012년 9월 14일 심사완료 Accepted on September 14, 2012

1 경일대학교 위성정보공학과 Dept. of Satellite Geoinfomatic Engineering, Kyungil University
2 창원과학고등학교 Changwon Science High School
※ Corresponding Author E-mail : khlee@kiu.ac.kr

reflectance of the FGA observed in the Yellow Sea and to develop a new index to detect FGA from satellite imagery, namely floating green algae index (FGAI), which uses relatively simple reflectance ratio technique. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) satellite images at 500m spatial resolution were utilized to produce FGAI which is defined as the ratio between reflectance at 860nm and 660nm bands. Both FGAI results yielded reasonable green algae detection at the regional scale distribution. Especially houly GOCI observations can present more detaield information of FGAI than low-orbit satellite.

KEYWORDS : Algae, Chlorophyll, Satellite, Floating Green Algae Index

서 론

조류(Algae)는 물속에서 생장하며 동화 색소를 가지고 독립 영양 생활을 하는 식물의 한 분류군이다. 조류는 수중 생태계에서 1차 생산자로서 중요한 역할을 당당하고 있으며, 양식생물의 먹이, 기능성 건강보조식품, 하수처리, 생물연료 등 다양하게 이용되고 있으므로 미세조류의 연구는 생태계에 대한 기초 연구뿐 만 아니라 산업분야에도 중요하다. 특히, 광합성을 하는 녹조류의 성장에는 온도, 광량, ph 등 여러 환경요인이 작용하며(최희정과 이승목, 2011), 광합성에 관여하는 빛의 파장에 의하여 영향을 받는다.

최근의 기후변화로 인한 수온 상승은 해마다 조류의 증식을 일으키며, 수질을 악화 시킨다(Mattews *et al.*, 2010). 중국 연안지역에서는 대규모의 녹조류가 바다를 덥고 있는 현상이 해마다 보고되고 있으며(그림 1 참조), 대규모의 녹조는 서해의 조류를 따라 이동하기도 한다. 이러한 조류의 발생과 감시를 위하여 위성영상을 이용한 원격탐사 기법의 활용이 늘어나고 있다(서영상 등 2003; Kuster *et al.*, 2006; Moses *et al.*, 2009). 원격탐사를 이용한 조류의 감시에는 주로 조류에 포함된 클로로필-a 성분에 대한 농도 분석 방법이 사용된다. 이 방법은 수체의 광 흡수(Absorption), 후방산란 계수(Backscattering coefficient)와 원격탐사 센서가 측정하는 반사도(Reflectance)와의 상관성을 기초로 하고 있다(Gordan *et al.*, 1988; Han *et al.*, 2010). 해양을 대상으로 하는 해색원격탐사(Ocean Color Remote Sensing)기법은 해수 중에 포함된 다양한 물질의 양과 종류를 인공위성이나 항공기 등에 탑재된 센서로 측정하며, 앞에서 언급한 해수의 광학 특성에 따라 색이 변하는 원리를 이용한다.

해수 중에 포함된 엽록소 측정을 위하여 청색이나 녹색 파장영역의 관측 자료를 이용하는 알고리즘(Tassan, 1994)과 미국 NASA에서 개발한 해색 알고리즘(OC4v4), 근적외-적색 파장을 이용하는 알고리즘(Gitelson *et al.*, 2008), 천리안 위성의 해색센서인 Geostationary Ocean Color Imager(GOCI)에 사용되는 다중 파장 알고리즘(문정언 등, 2010) 등이 널리 사용되고 있다. 그리고 인공위성에 탐재된 해색 센서로 관측된 자료는 연구자들에 의해 전 지구적인 규모나 지역적 규모에 대한 식물 플랑크톤의 증식을 연구하는데 중요하다는 것이 밝혀졌다(Ishizaka *et al.*, 1992). 해색 원격탐사를 통해 식물성 플랑크톤 분포 및 녹조 와 적조 감시가 가능하며 이를 관측하는 위성으로 Moderate Imaging Spectroradiometer(MODIS), Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor(SeaWiFS), Medium Resolution Imaging Spectrometer(MERIS)와 같은 지구관측 위성이 성공적으로 활용되었다(Han *et al.*, 2010).

FIGURE 1. The sea water covered with massive floating green algae in the coastline of Qingdao, east China's Shandong Province(photo from http://thewatchers.adorraeli.com/2011/07/26/green-algae -to-continue-spread-off-chinas-east-coastline/)

따라서 본 연구에서는 광역 녹조 현상에 대하여 보다 빠르고 간단한 감시를 위한 부유성 녹조 지수를 개발하고 위성영상에 적용하여 그 이용 가능성을 파악하였다. 특히 대표적인 저궤도 위성인 MODIS와 정지궤도 위성인 COMS/GOCI 영상을 이용하여 상호간의 녹조 탐지결과를 비교 분석하였다.

자료 및 방법

본 연구의 공간적 범위는 한반도와 주변 해양을 포함하는 북위 30° ~ 42°, 동경 117° ~ 132°에 해당하는 지역이다. 조사기간은 2011년 7월 중순경 서해상에 발생한 대규모 부유성 녹조 현상을 대상으로 하였다. 사용된 인공위성자료는 미국 NASA의 MODIS 자료 검색 시스템(http://ladsweb.nascom. nasa.gov)에서 제공하는 MODIS와 한국 해양위성 센터(http://kosc.kordi.re.kr)에서 제공하는 Level 1 Calibrated Radince 자료로서 모두 500m의 공간해상도를 가지는 자료를 사용하였다(표 1). GOCI Level 2(L2) 클로로필-a 자료는 녹조 영역의 비교를 위하여 사용되었다.

그림 2는 본 연구에서 사용된 위성자료의 자료처리 흐름도이다. 위성 자료는 원시자료인 Digital Number(DN) 값으로부터 주어진 변환식을 이용하여 복사량(Radiance)값으로 변환하였다. 이후 복사량을 반사도값으로 변환하기 위하여 다음 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$R_{Tot} = (\pi \cdot L)/(F_0 \cdot \cos\theta_0) \quad (1)$$

여기서, R_{Tot}는 인공위성이 관측하는 총 반사도, L은 위성이 관측한 복사량, F_0는 지구로 입사하는 태양 복사량, θ_0는 태양 천정각을 의미한다. 위성이 관측하는 총 반사도는 지구 대기와 지표에 의한 신호를 모두 포함하고 있으므로, 지구 대기에 의한 기여도를 제거하기 위하여 우선 대기 분자 산란을 제거해야 한다. 대기 분자 산란, 즉 Rayleigh 산란에 의한 반사도는 복사전달모델인 SBDART(Ricchiazzi *et al.*, 1998)를 이용하여 위성 영상의 각 픽셀 위치에 주어진 태양과 인공위성의 기하조건하에서 지표반사도와 대기 에어러솔의 기여가 없는 순수 대기 조건을 입력 자료로 하여 계산된 값을 이용하였다. 그리하여 Rayleigh 산란에 의한 반사도(R_{Ray})가 보정된 반사도(R_{RC})

TABLE 1. Dataset used in this study

Sensor	Description	Resolution	Source
MODIS (Terra and Aqua Platforms)	MODHKM or MYDHKM Level 1 Calibrated radiance	1 or 2 scene per day, 500m	NASA
MODIS (Terra and Aqua Platforms)	L2_LAC_OC Level 2 Ocean Color Products	1 or 2 scene per day, 1km	NASA
GOCI	GOCI_L1B_GA Calibrated radiance	Hourly, 500m	KOSC
GOCI	GOCI Level 2 Chlorophyll-a	Hourly, 500m	KOSC

는 식 (2)와 같이 제거한다.

$$R_{RC} = R_{Tot} - R_{Ray} \quad (2)$$

이러한 과정은 모두 육지를 제외한 해양에서만 이루어지며, Rayleigh 산란은 고도의 함수이므로 위성 자료에 포함된 DEM 자료와 LandMask를 이용하였다. 다음 단계로 대기 에어러솔 산란에 의한 반사도를 보정해야 하는데 한반도 주변지역은 세계적으로도 에어러솔의 발생이 많은 지역이므로(이권호 등 2002; 이권호 2011; 2012) 이에 대한 영향을 고려해야한다. 에어러솔에 대한 반사도(R_{Aer})는 위성 자료를 이용하여 대기 에어러솔 광학두께를 분석할 수 있는 Lee and Kim(2010)의 방법으로 사용하였다.

$$R_{AC} = R_{RC} - R_{Aer} \quad (3)$$

이렇게 대기에 의한 반사도가 보정된 반사도 값은 해수 표면의 녹조에 의한 신호를 분석하는데 사용되었다.

결과 및 고찰

1. 부유성 녹조의 광학특성

녹조류는 식물플랑크톤으로서 엽록소가 포함되어 있다. 이중 클로로필-a (Chlorophyll-a)

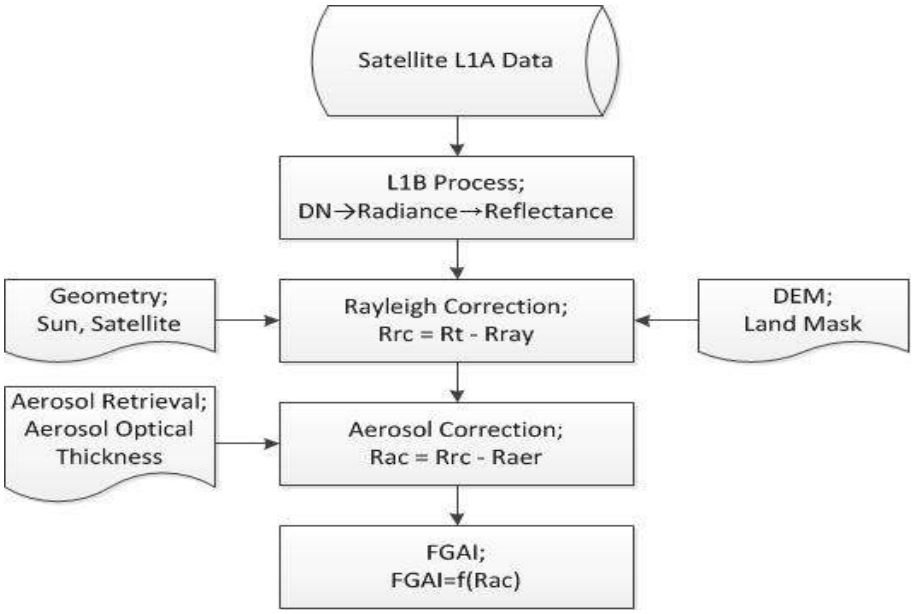

FIGURE 2. Schematic diagram of a data processing in this study

는 모든 식물플랑크톤에 다량으로 포함되어 있는 색소로서 클로로필-a의 양을 측정함으로서 조류의 생체량을 정량적으로 평가할 수 있다. 그림 3은 클로로필-a의 파장별 광 흡수계수와 광 방출도(형광신호)이다(Du *et al.*, 1998, Dixon *et al.*, 2005). 녹조류는 주로 청색 계열(약 400nm)과 적색 계열 (약 660nm)에서 빛을 흡수하며 680nm 근처에서 강한 형광신호를 발산하는 것으로 알려져 있다(그림 3). 따라서 이러한 광학특성을 이용하여 육지의 경우 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)와 같은 간단한 방법이 개발되었으나, 물 환경은 육지와는 다르게 물 분자에 의하여 단파 영역의 반사도가 높고 장파영역에서 강한 광 흡수성을 가지므로 주로 장파영역의 광 신호는 엽록소에 의한 신호로 간주하여 이를 감지하는 방법이 개발되었다(Han *et al.*, 2010).

그림 4는 2011년 7월 20일 오전 11시경 MODIS 500m 수평 해상도를 가지는 칼라합성영상에 나타난 서해안의 부유성 녹조발생 사례이다. 부유성 녹조 영역은 매우 작은 띠 형태로 나타나므로 칼라 합성영상에서 구분이 어려우나 부분적인 강조영상을 통하여 녹조의 위치를 짐작할 수 있다. 이 영상에서는 네가지 서로 다른 지역(부유성 녹조, 해수, 중국 황하강 하류의 부유물, 한국 서해남부의 부유물)을 설정하여 분광 반사도를 추출하였다(그림 4에서 사각형으로 표시한 지역). 그림 5는 각 영역에 대한 파장별 반사도를 나타내며, 비교적 청정한 해수의 경우는 600nm 이후로 급격하게 작아지는 일반적인 물의 반사도 형태를 나타내고 있으나, 중국과 한국 연안의 부유물은 모두 높은 반사도 값을 나타내고 있다. 녹조는 해수와 비슷한 분광 분사특성을 가지고 있으나 660nm에서 상대적으로 감소한 반사도와 860nm에서 반사도의 증가가 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 해수 표면에서 녹조류에 포함된 엽록소에 의한 광 흡수가 660nm에서 강하게 나타나는 것과 조류의 광학 특성에 의하여 860nm에서 광 산란 또는 반사가 증가한 것으로 판단된다. 이러한 현상은 Hu(2009)가 중국 청도에서 발생한 부유 조류 현상에 대한 분광 반사특성과도 일치하지만 반사도의 강도는 본 연구결과가 더 작게 나타났다. 또한 Hu(2009)는 865nm에서 반사도가 증가하는 특성을 이용하여 부유성 녹조 지수(Floating Algae Index; FAI) 를 다음

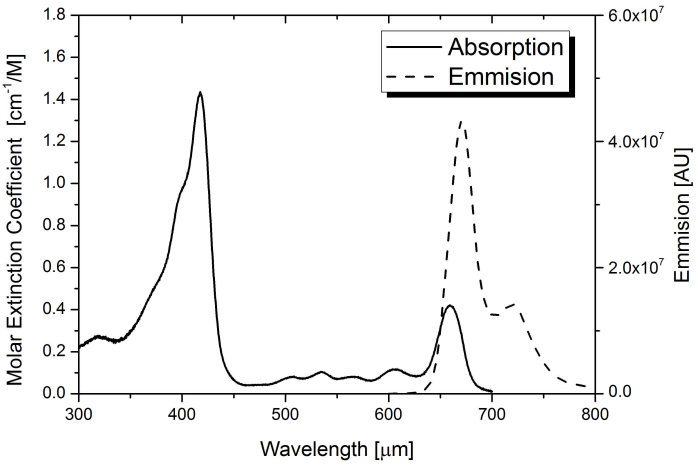

FIGURE 3. This optical absorption and the fluorescence emission spectrum measurement of Chlorophyll-a

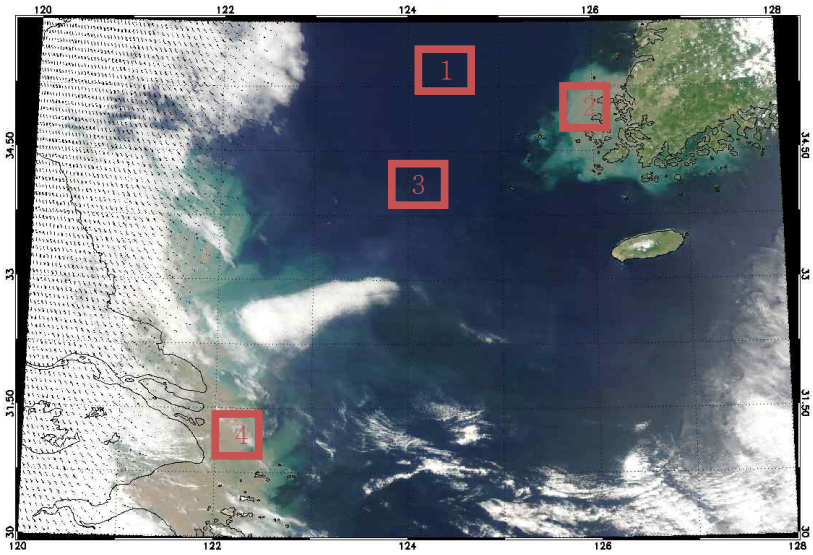

FIGURE 4. MODIS 500m resolution color composite RGB images of the Yellow Sea [30° E - 36° E, 120° N -128° N] where extensive green algal blooms were found between July 19-20, 2011. The rectangles mark the locations where reflectance spectra were extracted and analyzed in Fig. 4(Number in the rectangles are 1=water, 2=Korean sediment, 3=floating green algae, 4=Chinese sediment).

과 같이 정의하였다.

$$FAI = R_{AC,NIR} - (R_{RC,Red} + (R_{RC,SWIR} - R_{RC,Red}) \times (\lambda_{NIR} - \lambda_{Red})/(\lambda_{SWIR} - \lambda_{Red}) \quad (4)$$

위 식 (4)에서 사용된 파장은 각각 λ_{NIR}=860nm, λ_{NIR}=660nm, λ_{SWIR}=1240nm 이다. FAI는 다수의 부유성 녹조를 탐지하는데 효과적이나, 구름에 의한 오차가 발생할 수 있으며, 적외 채널이 없는 센서에서 사용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 간단하고 적외 채널의 사용에 구애받지 않기 위하여 식 (5)와 같이 새로운 부유성 녹조 지수(Floating Green Algae Index; FGAI) 를 제안하고자 한다. FGAI는 그림 5에서 녹조가 가지고 있는 적색 밴드에서의 광흡수와 근적외 밴드에서의 반사도가 증가하는 특성을 이용한다.

$$FGAI = \log(R_{RC,NIR}/R_{RC,Red}) \quad (5)$$

2. 부유성 녹조 지수 적용 사례

2011년 7월 19일에 서해안에서 발생한 녹조현상에 대하여 MODIS 자료(Terra: UTC02:15, Aqua: UTC05:30)로부터 FAI와 FGAI를 분석한 결과는 그림 6과 같다. 각 지도에서 자료가 없는 빈 부분은 구름영역 또는 연안 탁수영역과 Sun Glint 영역으로 녹조 지수 산출에서 제외된 부분이다. 구름영역의 제거는 단파장의 반사도 값이 0.25보다 크거나 3*3 픽셀에 대한 공간적 비균질성이 높은 값을 제거하는 방법을 사용하였다. 그리고 연안 탁수영역 픽셀의 제외는 그림 5에서 나타난 연안 탁수 영역의 550nm 밴드 반사도 값이 0.03보다 큰 지역을 제외하였다. Sun Glint 영역은 위성과 태양 간 기하조건에 의하여 계산된 Sun Glint Angle이 40도보다 작은 영역으로 지정하였다. 이와 같은 방법은 기존의 SeaWiFS 또는

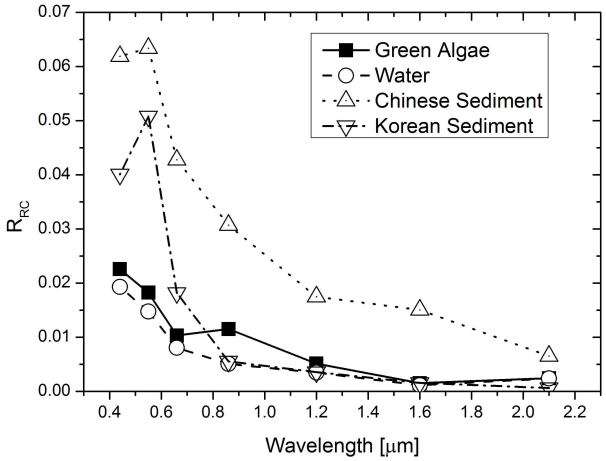

FIGURE 5. Spectral reflectance of different materials (green algae, water, and sediments) found in study region

MODIS에서 사용되어진 방법이다.

그림 6에서 FAI와 FGAI는 모두 서해상의 길게 나타난 녹조류의 띠에 대하여 녹조 지수에 대한 결과값이 주변값보다 상대적으로 높게 나타나고 있어 녹조류의 감지에 효과적임을 알 수 있다. 그리고 현재 NASA에서 현업용으로 운용되고 있는 해색알고리즘(OC4v4 알고리즘)으로부터 산출된 MODIS 클로로필-a 분석 자료는 해수 중 포함된 각종 조류의 엽록소를 산출하는 데에는 효과적이나 이렇게 해수 표면에 밀집된 녹조류를 검출하는 데에 한계가 있는 것으로 보인다. 즉, NASA의 현업용 알고

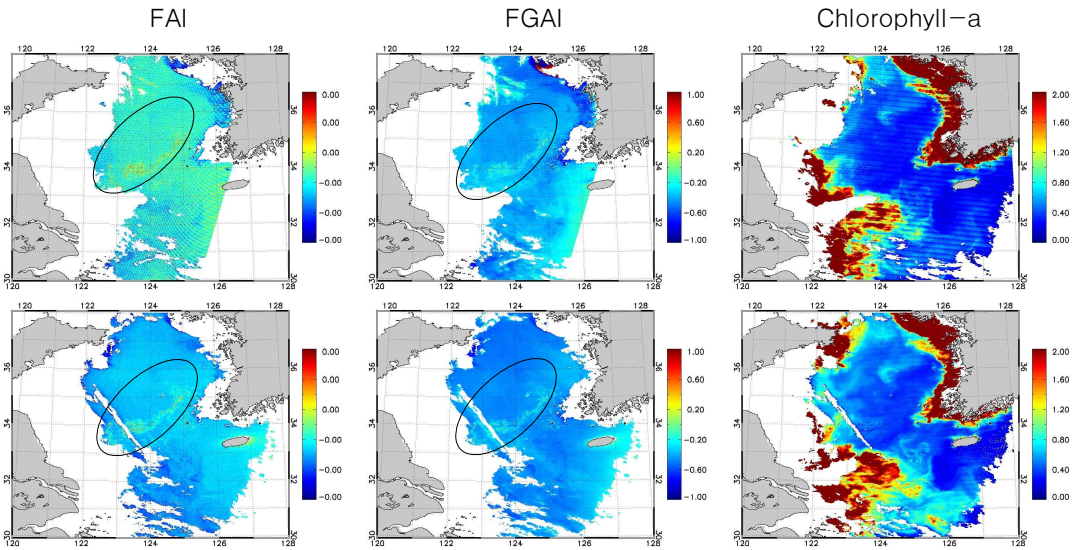

FIGURE 6. Comparison among MODIS FAI(left pannels), FGAI(middle pannels), Chlorophyll-a(right pannels). Top and bottom pannels are Terra/MODIS and Aqua/MODIS data on 20 July 2011. Black solid ellipse represents the floating green algae area.

리즘에는 412nm, 443nm, 490nm, 510nm, 555nm 밴드의 다파장 반사도값을 사용하여 클로로필-a 분석을 하므로, 그림 5에서의 부유성 녹조의 분광특성을 잘 반영하지 못하기 때문에 이러한 결과가 나타나는 것이다.

3. GOCI 자료응용

그림 6과 동일한 시간과 지역을 대상으로

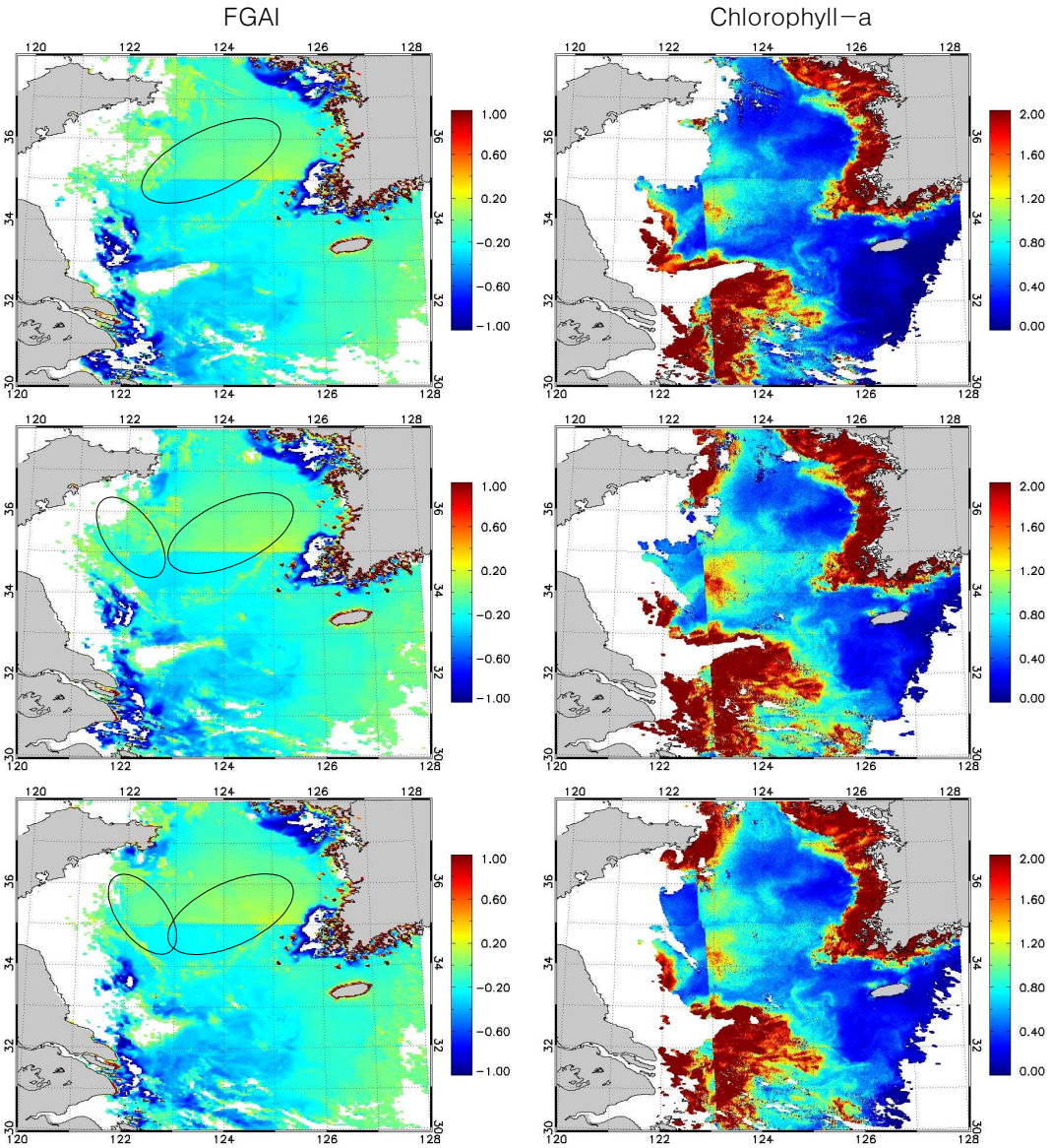

FIGURE 7. COMS/GOCI FGAI and Chlorophyll-a imagery at UTC 02:00 (top panel), 03:00 (middle panel), 04:00 (bottom panel) on 20 July 2011. Black solid ellipse represents the floating green algae area.

천리안 위성의 GOCI 영상자료로부터 부유성 녹조 지수와 클로로필-a 값을 비교하였다. 천리안 GOCI는 500m의 해상도를 가지며 한반도를 포함한 지역을 집중적으로 매 시간별 영상을 제공하므로 녹조에 대한 분포와 거동을 동시에 분석할 수 있는 장점이 있지만 해색을 위주로 설계가 되어 적외선 파장 밴드가 없는 단점이 있다. 본 연구에서 제안한 FGAI는 FAI와는 달리 적외 밴드가 필요하지 않으므로 GOCI자료를 이용한 부유성 녹조의 감시에 유용하다.

그림 7은 2011년 7월 20일 UTC 02~04 시간 동안 GOCI로부터 산출된 FGAI와 GOCI 표준 해색 알고리즘으로부터 산출된 클로로필-a 의 매 시간별 분석결과이다. 여기서 두 결과물은 부유성 녹조에 대하여 비슷한 분포 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. MODIS의 경우와 마찬가지로 FGAI와 클로로필-a 산출결과는 매우 다른 양상으로 나타나고 있어 클로로필-a 산출결과는 부유성 녹조를 감지하지 못하는 것을 증명한다.

그러나 GOCI의 지구 관측방식은 전체 16개의 슬롯으로 이루어진 모자이크 형식의 영상이므로 인접한 슬롯간의 경계에 불연속면이 발생한다. 그림 7에서도 북위 35도 부근에 남북경계방향과 동경 123도 근처의 동서경계 방향으로 불연속면이 발생한 것이 나타나고 북쪽 슬롯의 아랫부분의 FGAI 값이 비정상적으로 나타나고 있다. 현재 GOCI 개발팀에서 슬롯간의 불연속면을 보정하기 위한 기법을 개발 중에 있으므로 향후, 비정상적인 값에 대한 개선이 이루어질 것이다. 그럼에도 불구하고 매시간별 동일 지역에 대한 영상자료의 획득으로 인하여 부유성 녹조 띠가 중국연안에서 동쪽으로 이동하고 있는 것을 알 수 있다.

요약 및 결론

본 연구는 최근 서해안 지역에서 늦봄부터 여름철에 발생하고 있는 부유성 녹조류에 대한 광역 모니터링을 위하여 부유성 조류의 광학특성을 정량화하고, 이를 기초로 인공위성 원격탐사 자료로부터 부유성 조류를 탐지할 수 있는 부유성 녹조 지수 FGAI를 제안하였다. 부유성 녹조는 수중에 포함되어 있는 미세 플랑크톤에 포함되어 있는 소량의 엽록소를 측정하는 기존의 방법과는 다르게 해수 표면에 부유하는 대량의 녹조로서 근적외 영역에서 해수의 광흡수가 거의 일어나지 않으므로 적색 밴드와 근적외 밴드를 이용하여 분석이 가능하였다.

MODIS를 이용한 FGAI는 기존에 현업용으로 사용되고 있는 클로로필-a 자료로 불가능한 부유성 조류의 분포를 잘 나타내고 있다. 그리고 적생-근적외-적외 밴드를 사용하고 있는 FAI와 비슷한 결과를 나타내지만 적외 밴드가 필요한 FAI와는 달리 두 개의 밴드만 사용하므로 보다 간단하고 적외 밴드가 없는 해색센서 자료에 적용이 가능하다. 이러한 장점으로 인하여 천리안 위성의 해색 탑재체인 GOCI 자료를 이용한 FGAI를 분석한 결과는 MODIS의 경우와 마찬가지로 부유성 녹조의 분포 및 이동을 탐지하는데 매우 효과적임을 밝혔다.

해수의 온도가 증가하는 계절에 녹조의 번식은 기후변화의 한 결과로 추정되며 어업에도 영향을 미치는 인자임을 고려할 때, 인공위성 영상으로부터 녹조를 감시하는 것은 지역 기후환경 및 수산업 분야에 활용될 수 있다. 따라서 천리안 위성과 같은 정지궤도 위성자료로부터의 진보된 시공간 해상도를 가지는 자료를 산출한다면 향후 보다 정확한 예측이 가능 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업인 “정지궤도 해양위성(GOCI) 활용 연구 지원”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. KAGIS

참고문헌

문정언, 안유환, 유주형, P. Shanmugam. 2010. 정지궤도 해색탑재체(GOCI) 해수환

경분석 알고리즘 개발. 대한원격탐사학회지 26(2):189-207.

이권호. 2011. 지구관측 위성자료를 이용한 주요 대기 에어러솔 성분의 공간분포 분석. 한국지리정보학회지 14(2):109-127.

이권호. 2012. 동북아시아 지역의 바이오매스 연소 활동이 지역 대기 환경에 미치는 영향. 한국지리정보학회지 15(1):184-196.

이권호, 김정은, 김영준, 서애숙, 안명환. 2002. GMS-5 인공위성 원격탐사 자료를 이용한 대기 에어러솔 모니터링. 한국지리정보학회지 5(2):1-15.

최희정, 이승목. 2011. 온도, 광세기 및 pH에 따른 Chlorella Vulgaris 증식률/ 대한환경공학회지 33(7):511-515.

Dixon, J.M., M. Taniguchi and J.S. Lindsey. 2005. PhotochemCAD 2. A Refined Program with Accompanying Spectral Databases for Photochemical Calculations, Photochem. Photobiol. 81:212-213.

Du, H., R.-C. A. Fuh, J. Li, L.A. Corkan and J.S. Lindsey. 1998. PhotochemCAD: A computer-aided design and research tool in photochemistry. Photochem. Photobiol. 68:141-142.

Gitelson, A.A., G. Dall' Olmo, W. Moses, D.C. Rundquist, T. Barrow, T.R. Fisher, D. Gurlin and J. Holz. 2008. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. Remote Sensing of Environment 112:3582-3593.

Gordan, H.R., O.B. Brown, R.H. Evans, J.W. Brown, R.C. Smith, K.S. Baker and D.K. Clark. 1988. A semianalytic radiance model of ocean color. Journal of Geophysical Research 93:10909-10924.

Han, X., W. Zheng, and C. Wu. 2010. Chlorophyll-a estimation using satellite observations in Tai Lake, China. Proceeding of International Conference on Multimedia Technology(ICMT) 1:4.

Hu, C. 2009. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. Remote Sens. Environ 113:2118-2129.

Ishizaka, J., H. Fukushima, M. Kishino, T. Saino and M. Takahashi. 1992. Phytoplankton pigment distributions in regional upwelling around the Izu Peninsula detected by coastal zone color scanner on May 1982. J. Oceanogr. 48:305-327.

Kutser, T., L. Metsamaa, N. Strombeck and E. Vahtmae. 2006. Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. Estuarine, Coastal and Shelf Science 67:303-312.

Lee, K.H. and Y.J. Kim. 2010. Satellite remote sensing of Asian aerosols: a case study of clean, polluted and dust storm days. Atmos. Meas. Tech. 3:1771-1784, doi:10.5194/amt-3-1771-2010.

Matthews, M.W. 2010. Remote sensing of water quality parameters in Zeekoevlei, a hypertrophic, cyanobacteria-dominated lake, Cape Town, South Africa, Cape Town. M.Sc. of University of Cape Town.

Moses, W., A. Gitelson, S. Berdnikov and V. Povazhnyy. 2009. Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS - The

Azov Sea case study. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 6:845-849.

Ricchiazzi, P., S. Yang, C. Gautier and D. Sowle. 1998. SBDART: A research and teaching tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere, Bull. Am. Meteorol. Soc. 79:2101-2114, doi:10.1175/1520-0477.

Tassan, S. 1994. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. Applied Optics 33:2369-2378. KAGIS