Korean Journal of Remote Sensing, Vol.36, No.6-1, 2020, pp.1339~1348
https://doi.org/10.7780/kjrs.2020.36.6.1.5

ISSN 1225-6161 (Print)
ISSN 2287-9307 (Online)

Article

동해에서 식물플랑크톤 군집 분포 분석을 위한 GOCI 활용 연구

최종국[1] · 노재훈[2]† · Robert J.W. Brewin[3] · Xuerong Sun[4] · 이미진[5]

A Study on the Application of GOCI to Analyzing Phytoplankton Community Distribution in the East Sea

Jong-kuk Choi[1] · Jae Hoon Noh[2]† · Robert J.W. Brewin[3] · Xuerong Sun[4] · Charity M. Lee[5]

Abstract: Phytoplankton controls marine ecosystems in terms of nutrients, photosynthetic rate, carbon cycle, etc. and the degree of its influence on the marine environment depends on their physical size. Many studies have been attempted to identify marine phytoplankton size classes using the remote sensing techniques. One of successful approach was the three-component model which estimates the chlorophyll concentrations of three phytoplankton size classes (micro-phytoplankton; >20 μm, nano-; 2-20 μm and pico-; <2 μm) as a function of total chlorophyll. Here, we examined the applicability of Geostationary Ocean Colour Imager (GOCI) to the mapping of the phytoplankton size class distribution in the East Sea. A fit of the three-component model to a biomarker pigment dataset collected in the study area for some years including a large harmful algal bloom period has been carried out to derive size-fractioned chlorophyll concentration (CHL). The tuned three-component model was applied to the hourly GOCI images to identify the fractions of each phytoplankton size class for the entire CHL. Then, we investigated the distribution of phytoplankton community in terms of the size structure in the East Sea during the harmful *Cochlodinium polykrikoides* blooms in the summer of 2013.

Key Words: Phytoplankton Size Class, GOCI, East Sea, Three-component Model

Received November 25, 2020; Revised December 8, 2020; Accepted December 11, 2020; Published online December 23, 2020

[1] 한국해양과학기술원 해양위성센터 책임연구원 (Principal Researcher, Korean Ocean Satellite Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)
[2] 한국해양과학기술원 해양생태연구센터 책임연구원 (Principal Researcher, Marine Ecosystem Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)
[3] 엑서터 대학 펜린 캠퍼스, 생명환경 과학대학 정교수 (Professor, College of Life and Environmental Sciences, University of Exeter, Penryn Campus, Cornwall, UK)
[4] 화동 사범대학 하구 및 해안 국가 핵심 연구소, 박사과정생 (Ph.D. Student, State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, China)
[5] 한국해양과학기술원 해양법제도연구실 책임기술원 (Principal Research Specialist, Ocean Laws & Legal Regime Research Section, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

† Corresponding Author: Jae Hoon Noh (jhnoh@kiost.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요약: 식물성플랑크톤은 영양염, 광합성, 탄소순환 등의 측면에서 해양의 생태계를 제어하는데, 해양 환경에 미치는 영향의 정도는 식물성플랑크톤의 크기에 좌우된다. 원격탐사 기술을 기반으로 해양의 식물성플랑크톤 크기 별 생체량을 식별하려는 많은 연구가 있었으며, 그 중 가장 성공적인 접근법 중 하나는 식물성플랑크톤의 크기를 세 등급(micro-plankton;> 20 μm, nano-; 2-20 μm 및 pico-; <2 μm)으로 구분하여 각 그룹별 엽록소 농도를 추정하는 삼성분 모델(three-component model)이다. 이 연구에서는 동해에서 식물성플랑크톤의 크기 별 생체량 분포를 추정하기 위한 GOCI 자료의 활용 가능성에 대해 검토하였다. 각 크기 별 엽록소 농도(CHL)를 도출하기 위해, 연구지역에서 수 년 동안 수집된 식물성플랑크톤 색소자료를 기반으로 회귀분석을 통해 삼성분 모델의 계수를 산출하였다. 새롭게 산출된 삼성분 모델을 시간 별 GOCI 기반 엽록소 농도 이미지에 적용하여, 전체 엽록소 농도 중 각 식물성플랑크톤 크기 별 생체량이 차지하는 비율을 산출하였다. 또한, 이 결과를 이용하여 동해에서 2013년 여름 대규모 적조가 발생한 시기의 크기 별 엽록소-a 농도 분포를 분석하였다.

1. 서론

광합성에 의한 일차 생산을 담당하는 식물성플랑크톤은 다양한 해양의 현상 및 지구 탄소순환, 궁극적으로 기후변화에 있어 중요한 역할을 담당한다. 식물성플랑크톤이 해양 환경에 미치는 영향의 정도는 해수 내 식물성플랑크톤의 유형에 따라 다른데, 각 식물성플랑크톤 군집은 그 유형별로 탄소순환에 다른 영향을 주게 된다. 예를 들어, 크기가 큰 식물성플랑크톤은 분해될 때 작은 것보다 해저로 가라앉는 침강률이 더 높아, 해저 탄소침적에 더 큰 역할을 한다. 또한 와편모조류(dinoflagellates) 및 규조류(diatom)와 같은 일부 유형의 식물성플랑크톤은 높은 농도로 번성하여 유해적조(harmful algal bloom)를 일으키는 등 해양환경에 악영향을 주기도 한다(Aiken *et al*., 2014). 우리나라에서는 와편모조류인 코클로디니움 폴리크리코이데스(*Cochlodinium polykrikoides*)의 유해한 적조가 1995년 이후 남해에서 자주 발생하여 동해 전역까지 퍼지면서 연안의 어업에 지속적으로 피해를 주고 있다(Kang *et al*., 2002; Kim *et al*., 2010; Lee, 2008; Son *et al*., 2012). 따라서 해양 환경을 더 잘 이해하고 관리하기 위해서는 식물성플랑크톤의 기능 유형(phytoplankton functional type, PFT)에 대해 이해하는 것이 중요하다.

식물성플랑크톤의 기능 유형에 대한 연구는 광범위하게 진행되어 왔으며, 특히 생지화학적 기능군과 크기 별 생체량 구분 측면에서 원격탐사 기술이 널리 적용되어 왔다. 특히 원격탐사 기반의 해양 식물성플랑크톤 크기 별 구분(phytoplankton size class, PSC) 연구가 많이 진행되어 왔는데, 많은 식물성플랑크톤 유형의 생지화학적 기능이 식물플랑크톤 군집의 크기 별 생체량 조성과 일치함을 보였으며, 일반적인 식물성플랑크톤 크기 별 구분은 마이크로 식물성플랑크톤(micro-phytoplankton)(> 20 μm), 나노(nano-phytoplankton)(2-20 μm) 및 피코(pico-phytoplankton)(<2 μm) 세 등급으로 나뉜다(Aiken *et al*., 2014; Brewin *et al*., 2010). PSC에 대한 연구는 주로 극궤도 해색위성 기반의 전지구적 규모로 대양의 맑은 해역(case 1 water)에서 성공적으로 수행되어 왔다(Brewin *et al*., 2010; Bricaud *et al*., 2012; Ciotti *et al*., 2002; Devred *et al*., 2006; Hirata *et al*., 2008; Uitz *et al*., 2006). 한편, 정지궤도 해색위성인 천리안해양위성(Geostationary Ocean Color Imager, GOCI)은 연안 해수 내 식물성플랑크톤 군집의 단기 변동성을 조사하는 데 적합하며, 최근에는 PSC 연구에 적용된 바 있다(Lou and Hu, 2014; Ruddick *et al*., 2014; Sun *et al*., 2018).

GOCI는 주간에 한 시간 간격으로 영상을 획득하여 한반도 주변 해양환경의 시간별 변화를 관측할 수 있다. GOCI는 16개 슬롯의 이미지로 구성되어 500 m 공간해상도로 우리나라 주변해역을 촬영하며, 중심 파장 412 nm, 443 nm, 490 nm, 555 nm, 660 nm 및 680 nm의 6개 가시광선 밴드와 745 nm와 865 nm 중심 파장의 2개 근적외선 밴드로 구성되어 있다(Choi *et al*., 2012). GOCI는 우리나라 연안 해수의 탁도, 해수면 흐름 및 냉수대의 단기 변화를 관측하는데 성공적으로 활용되었으며(Choi *et al*., 2012; Choi *et al*., 2014b; Park *et al*., 2012; Yang *et al*., 2014; Yoon and Yang, 2016), 최근에는 2013년 8월 동해에서 발생한 대규모 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 시간 별 이동 및 확산 모니터링에 관한 연구에 적용된 바 있다(Choi *et al*., 2014a; Kim *et al*., 2016).

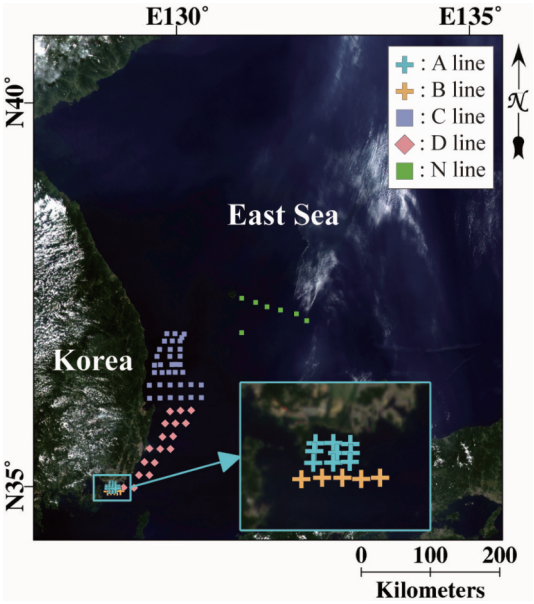

Fig. 1. GOCI daily composite RGB image of the study area acquired on 13 August 2013 along with the sampling point of biomarker pigments.

이 연구에서는 2013년 여름 대규모 유해 적조 발생 시기에 대해, GOCI를 이용하여 동해지역에서 식물성플랑크톤 군집의 시간 별 변화를 관측하고자 한다(Fig. 1). GOCI로부터 추정된 엽록소농도(CHL) 영상으로부터 micro-, nano-, pico- 각 식물성플랑크톤 크기 별로 엽록소 농도를 계산하고, 전체 CHL에 대한 각 크기 별 농도 비율 역시 추정하여 이들의 시간 별 변화를 알아본다. 이를 통해, CHL이 매우 높게 나타나는 대규모 적조 발생 지역에서 PSC 연구를 위해 GOCI가 적용 가능함을 알아보고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

1) PSC 모델

이 연구에서 적용된 식물플랑크톤의 크기 별 군집 분류는 high performance liquid chromatography (HPLC) 방법에 근거를 두고 있다. 현장조사를 통해 얻어진 HPLC 자료를 대상으로 식물플랑크톤 진단 색소 분석(diagnostic pigment analysis, DPA)을 실시하여 색소 별 엽록소 농도를 계산하고, 기존 대부분 연구에서 널리 활용되었던 Uitz *et al.* (2006)의 분류를 바탕으로 수정하여 각 색소 별 크기 그룹을 할당하였다. Table 1에 기존 연구들 및 이 연구에서 사용한 진단 색소 분류 내역을 표기하였다. 각 색소 별 농도 값을 이용하여 micro-, nano-, pico- 각 PSC 그룹별 CHL을 계산하는 방법은 다음과 같다. 먼저, 각 색소 별 가중치를 적용하여 구한 농도 합(C_w)은 식 (1)과 같이 구해진다(Uitz *et al.*, 2006; Vidussi *et al.*, 2001).

$$C_w = 1.41\mathrm{Fuco} + 1.41\mathrm{Perid} + 1.27\mathrm{Hex} + 0.4\mathrm{Allo} + 0.35\mathrm{But} + 1.01\mathrm{Chl}-\mathrm{b} + 0.86\mathrm{Zea} \quad (1)$$

식 (1)의 각 변수의 의미는 Table 1에 표기하였다. 또한, 각 PSC별 CHL 분합(size-fractionated CHL, F)은 Brewin *et al.* (2010)과 Hirata *et al.* (2011)이 제안한 식 (2)~(4)의 방법에 의해 구해진다.

$$F_m = 1.41 \times [Fuco + Perid]) / C_w \quad (2)$$

$$F_n = (P_{Hex\text{-}n} \times 1.27 \times Hex + 1.01 \times Chl - B + 0.35 \times But + 0.6 \times Allo) / C_w \quad (3)$$

$$F_p = [(1 - P_{Hex\text{-}n}) \times 1.27 \times Hex + 0.86 \times Zea]) / C_w \quad (4)$$

m, n, p 첨자는 각각 micro-, nano-, pico- 그룹을 나타

Table 1. Table1. Diagnostic pigments used for infering phytoplankton size class from Uitz *et al.* (2006), Brewin *et al.* (2010), Hirata *et al.* (2011), and this study

Diagnostic pigment	Toxonomic group	Uitz *et al.* (2006)	Brewin *et al.* (2010)	Hirata *et al.* (2011)	This study
Fucoxanthin (Fuco)	Diatoms	Micro	Micro	Micro/Nano	Micro
Peridinin (Perid)	Dinoflagellates	Micro	Micro	Micro	Micro
19'-Hex-Fucoxanthin (Hex)	Prymnesiophytes	Nano	Nano/Pico	Nano/Pico	Nano/Pico
19'-But-Fucoxanthin (But)	Pelagophytes	Nano	Nano	Nano	Nano
Alloxanthin (Allo)	Cryptophytes	Nano	Nano	Nano	Nano
Chlorophyll-b (Chl-b)	Chlorophytes	Pico	Pico	Nano	Nano
Divinyl Chlorophyll-b	Prochlorophytes	Pico	Pico		
Zeaxanthin (Zea)	Cyanobacteria	Pico	Pico	Pico	Pico
	Prochlorophytes				

낸다. $P_{Hex\text{-}n}$은 19'-Hex-Fucoxanthin 색소(Hex)의 nanophytoplankton 그룹에의 기여도를 나타내는데, 이 연구에서는 취득된 현장자료를 분석하여 얻어진 경험 식에 근거하여 0.6499로 설정하였다.

세 개의 각 PSC의 CHL과 총 CHL(C)과의 관계는 두 개의 지수함수를 이용하여 개발된 삼성분 모델(three-component model)에 의해 정량화할 수 있으며, picophytoplankton의 CHL(C_p, cells < 2 μm)과 pico- 및 nanophytoplankton의 CHL 합(C_{pn}, cells <20 μm)에 대해 각각 식 (5)와 (6)과 같이 정의된다(Brewin *et al.*, 2010; Sathyendranath *et al.*, 2001).

$$C_{pn} = C_{pn}^{m}\,[1 - \exp(-D_{pn} / C_{pn}^{m}\,C)] \quad (5)$$

$$C_{p} = C_{p}^{m}\,[1 - \exp(-D_{p} / C_{p}^{m}\,C)] \quad (6)$$

C_{pn}^{m}과 C_{p}^{m}은 각 PSC의 지수함수가 가지는 점근적 최대값이며, Dpn과 Dp는 총 CHL 값의변화에 대한 각 PSC의 농도 변화율을 나타낸다. 즉, 식 (5)와 (6)에 의해, 크기 등급별 농도 값이 총 농도 값보다 더 빨리 증가할 수 없기 때문에 D_{pn}과 D_p는 1보다 크거나 0보다 작을 수 없다. 또한, C_p (< 2 μm)가 C_{pn} (<20 μm)보다 커질 수 없기 때문에 D_{pn}는 항상 D_p 보다 크다. 식 (5)와 (6)을 이용하여 nanophytoplankton 그룹의 CHL(Cn)과 microphytoplankton 그룹의 CHL(Cm)은 식 (7)과 (8)을 이용하여 계산된다.

$$C_n = C_{pn} - C_p \quad (7)$$

$$C_m = C - C_{pn} \quad (8)$$

각 PSC의 총 CHL에 대한 농도 비율(F_p, F_m, F_m)은 각 PSC의 CHL을 C로 나누어 줌으로써 식 (9)~(11)과 같이 구할 수 있다.

$$F_p = C_p / C \quad (9)$$

$$F_n = C_n / C \quad (10)$$

$$F_m = C_m / C \quad (11)$$

2) 연구자료

식 (5)와 (6)의 삼성분 모델에서 미지수에 해당하는 변수들(C_{pn}^{m}, C_{p}^{m}, D_{pn}, D_{p})의 값을 추출하기 위해 Matlab 프로그램에서 제공하는 최소자승모델을 사용하였으며, 여기에 연구지역에서 획득한 총 92개의 생물지표 색소(biomarker pigment)가 적용되었다. 2013년 적조발생 해역은 표층 색소시료를 채집 후 HPLC 분석을 수행하였고(Noh *et al.*, 2018), 독도해역은 깊이별 시료를 채집 후 색소를 분석하였다. 총 92개의 현장관측 자료 중, 66개는 대규모 적조가 발생하여 동해안의 넓은 지역에 확산된 2013년 8월에 6일부터 13일까지 부산 근해에서 동해안을 따라 북쪽으로 이동하면서 얻어진 자료이다(Fig. 1의 A~D line). 이들 자료의 평균 CHL은 76.47 mg/m^3, 최대값과 최소값은 각각 1,256.05 mg/m^{3}와 0.18 mg/m^{3}이다. 26개의 자료는 2013년부터 2017년까지 주로 8월과 9월에 울릉도 및 독도 주변 맑은 해역에서 얻어진 자료이며(Fig. 1의 N line), 이들 자료의 평균 CHL은 0.27 mg/m^3, 최대값과 최소값은 각각 0.55 mg/m^{3}와 0.13 mg/m^{3}이다.

사용된 GOCI 자료는 2013년 8월 13일의 자료이다. GOCI의 16개 슬롯 중에서 연구지역은 5번째와 6번째 슬롯에 해당하며, 각각 매시 25분과 27분에 영상이 획득된다. 각 시간 별 두 슬롯의 이미지는 하나의 이미지로 통합되어, 09시 25분(09시 25분과 27분에 획득된 영상의 통합 이미지)부터 16시 25분(16시 25분과 27분에 획득된 영상의 통합 이미지)까지 8개 영상을 생성하여 연구에 적용하였다. 대기보정에 적용된 알고리즘은 GOCI 자료 고유의 자료처리 프로그램인 GOCI data processing software(GDPS) 버전 2.0의 알고리즘을 기본으로 하여, 적조가 발생한 해역에 적합하도록 부분적으로 개선된 알고리즘을 활용하였다(Ahn *et al.*, 2016; Ahn *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2001; Noh *et al.*, 2018). 대기보정을 통해 각 8개 시간 별로 각 밴드 별 원격반사도(remote sensing reflectance, Rrs) 자료를 산출하고 이로부터 각 시간 별 CHL을 산출하였는데, 이 때 적조발생 해역처럼 매우 높은 CHL에 적용 가능하도록 개발된 RBR(red to blue ratio) 알고리즘을 이용하였다(Noh *et al.*, 2018). 각 시간 별로 얻어진 GOCI CHL 분포도를 대상으로 식 (5)~(11)를 적용하여, 각 시간별 mirco-, nano-, pico- 그룹의 CHL과 총 CHL에 대한 백분율을 계산하였다.

3. 연구결과

Fig. 2는 총 92개의 생물지표 색소를 이용하여 삼성분 모델에 피팅한 결과 그래프를 보여준다. 그림에서 보듯이, 총 CHL은 0.13~1,256 mg/m^{3}에 이르는 넓은 범위의

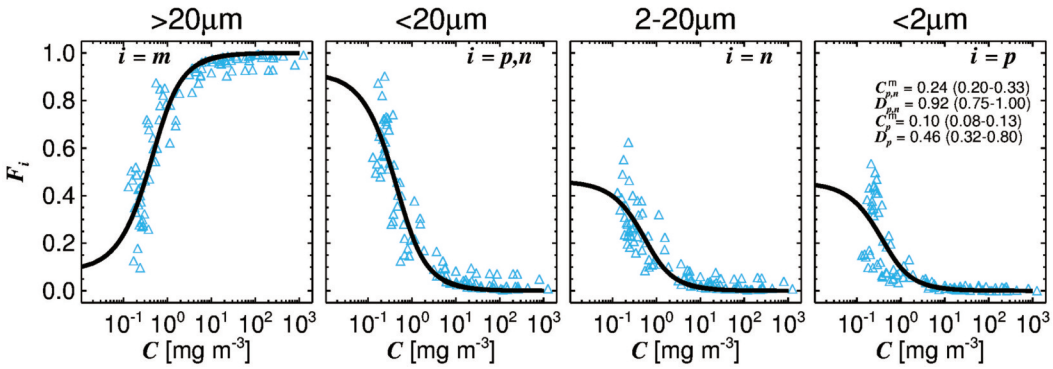

Fig. 2. Tuning of the three-component model to a dataset collected in this study. Fi is the fraction of total chlorophyll (C), where i is either m (micro), n (nano), p (pico), or pn (pico+nano).

Table 2. Parameter values for the three-component model in this study along with those from some previous studies

Study	C^m_{pn}	C^m_p	D_{pn}	D_p	Location
Brewin *et al.* (2010)	1.06	0.11	0.90	0.73	Atlantic Ocean
Brewin *et al.* (2012)	0.94	0.17	0.97	0.82	Indian Ocean
Lin *et al.* (2014)	0.95	0.26	0.94	0.91	South China Sea
Lamont *et al.* (2018)	0.72	0.11	0.98	0.98	Southern Africa
Sun *et al.* (2018)	0.33	0.05	1.00	0.91	Continental shelf sea, China
This study	0.24	0.10	0.92	0.46	East Sea

값 분포를 보이고 있으며, 이는 현장관측 자료가 동해에 넓게 확산된 유해적조종인 *Cochlodinium polykrikoides*를 포함하고 있기 때문이다(Choi *et al.*, 2014a; Noh *et al.*, 2018). 이 식물성플랑크톤 종은 해양의 dinoflagellate로서 크기가 큰 microphytoplankton에 속한다. Fig. 2와 같이 추출된 삼성분 모델의 각 미지 변수들(C^m_{pn}, C^m_p, D_{pn}, D_p)의 값을 Table 2에 나타내었다. 이전 연구에서 동일한 모델을 활용하여 설정된 여러 해역 별 변수의 값을 함께 표기하였으며, 특히 C^m_{pn}의 경우 연구지역에서 상대적으로 매우 낮은 값을 보임을 알 수 있다. 이는 microphytoplankton에 해당하는 유해적조종이 번성한 때에 얻어진 현장 관측자료를 사용함으로써, nano-와 pico-의 농도가 상대적으로 낮은 때문인 것으로 판단된다. Fig. 2와 Table 2를 통해 삼성분 모델이, 큰 크기의 세포가 우점하는 극히 높은 농도의 클로로필 환경에서도, 또한 한반도 주변에서도 적용 가능함을 알 수 있다.

Fig. 3(a)는 2013년 8월 13일 11시 26분에 얻어진 GOCI 영상으로부터 계산된 연구지역의 CHL 영상이다. 붉은색으로 표현된 높은 엽록소 농도 분포 지역이 적조 띠가 넓게 분포하고 있는 지역으로, 주변 지역과 비교해도 월등히 높은 농도를 보이고 있음을 알 수 있다. 이 영상에서의 평균 CHL은 5.20 mg/m^{3}이었으며, 최대 농도는 323.51 mg/m^{3}으로 나타났다. Fig. 3(b)~(d)는 이 연구의 삼성분 모델 결과를 2013년 8월 13일 11시 26분 GOCI CHL 영상에 적용하여 얻어진, 각 PSC의 총 CHL에 대한 농도 비율(F_m, F_n, F_p) 영상이다. Microphytoplankton에 해당하는 유해 적조 종이 주로 분포한 고농도 지역을 따라 micro-의 비율이 매우 높은 것을 알 수 있다(Fig. 3(b)). Micro-의 비율은 연구지역에서 평균 80.30%인 것으로 나타났으며, 55% 이상의 픽셀에서 Fm이 0.80 이상의 값을 보였다. 이 시기 연구지역에 분포하는 식물 플랑크톤의 대부분이 mircophytoplankton에 해당함에 따라, nano-와 pico의 비율은 극히 낮은 값을 보인다(Fig. 3(c)와 (d)). Nano-와 pico-의 백분율은 각각 평균 11.26%와 8.45%로 나타났으며, 38%과 34.5%의 최대값을 보였다. 연구지역에서 값의 분포 또한 유사하게 나타나, Fig. 3(c)와 (d)에서 보듯이 육안으로 F_n과 F_p의 차이를 확인하기 어려울 정도이다. 즉, 유해 적조 종인 *Cochlodinium polykrikoides*의 대규모 확산으로 인해 상대적으로 nano- 및 picophytoplankton의 농도와 비율이 매우 낮게 나타난 것으로 판

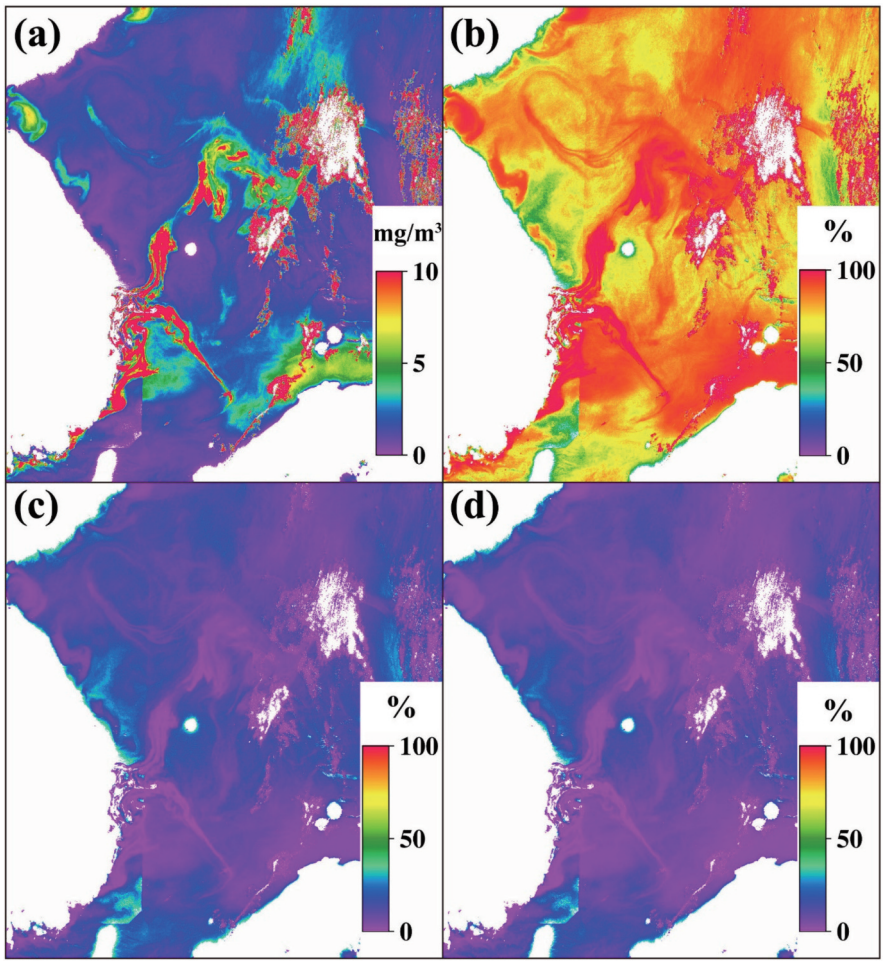

Fig. 3. GOCI-derived chlorophyll-a concentration (a) and percentage of each PSCs (b: micro-, c: nano- and d: pico-) in the East Sea generated from the GOCI image taken at 11:25 on 13 August 2013 local time.

단된다.

현장관측 자료 중 GOCI 영상과 매칭이 가능한 14개 자료를 대상으로 위성으로부터 계산된 총 CHL, 각 PSC 별 CHL 및 총 CHL에 대한 백분율 값과 비교하였다. 이 연구에 사용된 GOCI 영상은 매시 25분에 획득된 영상이기 때문에, 영상 획득 전후 30분 이내에 취득된 현장자료와 매칭을 실시하였다. 즉, 08시 55분부터 09시 54분 사이에 취득된 현장관측 자료는 09시 25분 GOCI 영상과, 09시 55분부터 10시 54분 사이에 취득된 현장관측 자료는 10시 25분 GOCI 영상과 비교하였다. Fig. 4(a)에 보듯이, GOCI에서 추정된 총 CHL과 microphytoplankton의 CHL은 현장자료와 높은 일치도를 보였다(R^2=0.68). 그러나, nano- 및 picophytoplankton의 CHL은 현장관측 자료와 별다른 상관관계가 없는 것으로 나타났는데, 이것은 Fig. 3에서 보듯이 microphytoplankton이 우점하고 nano- 및 pico-가 극히 미량으로 존재하는 결과를 반영한 것으로 판단된다. 각 PSC별 CHL 백분율의 경우, 식물플랑크톤의 크기가 커질수록 GOCI 추정 백분율과 현장관측 자료의 백분율이 모두 커지는 일정한 경향을 보이긴 하나, 역시 nano-(R^2=0.33)와 pico-(R^2=0.36)가 유의미한 상관관계를 보이지 않는 것으로 분석되었다 (Fig. 4(b)). 즉, 매우 높은 농도의 CHL 환경에서 삼성분 모델이 microphytoplankton의 우점 특성을 잘 표현하고 있으나, 좀 더 정밀한 크기 군집 별 분석을 위해서는 일반적인 맑은 해역 환경에서의 많은 현장자료를 활용한 분석이 필요할 것으로 보인다.

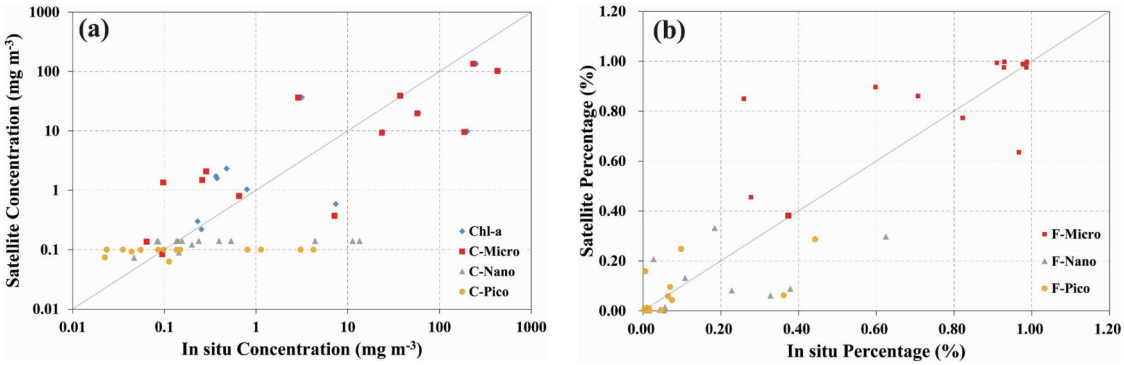

Fig. 4. Validation of GOCI estimations using the three-component model modified in this study through 14 match-ups, including (a) total CHL and size-fractionated CHL of each PSC, and (b) size-fractionated percentages of each PSC.

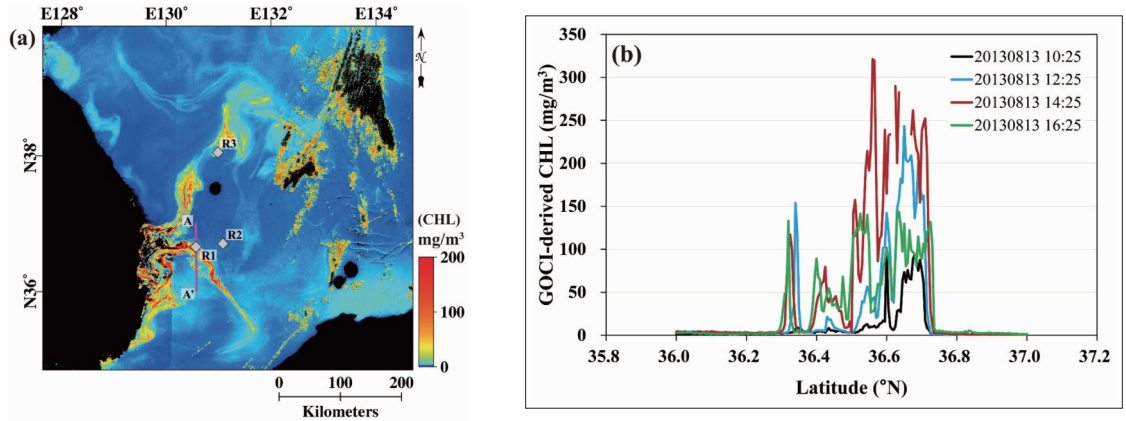

Fig. 5. (a) A transect (A-A') and three locations (R1~R3) used for diurnal variation overlaid on GOCI-derived CHL image at 11:25 on 13 August 2013 local time, and (b) diurnal variation in GOCI-derived CHL along the transect.

적조가 대규모로 번성한 2013년 8월 13일에 대해 09시 25분부터 16시 25분까지 획득된 8개 영상으로부터 시간 별 총 CHL과 각 PSC 별 CHL 값의 시간 별 변화를 분석하였다. Fig 5(a)의 측선 A-A′을 따른 CHL 값의 시간 별 변화를 Fig. 5(b)에 나타냈다. 오전과 오후 늦은 시간에는 전체적으로 낮은 CHL 값을 보였으며, 15시 25분에 최대 CHL 값을 보였다. 이는 Choi *et al.* (2014a)의 결과에서 보듯이, 유해 적조 종의 상하 이동(vertical migration)을 잘 반영하는 것이다. Fig. 5(a)의 세 지점인 R1, R2 및 R3에서 시간 별 총 CHL과 각 PSC 별 CHL 값의 시간 별 변화를 Fig. 6에 나타냈다. R1은 하루 중 최저 50 mg/m^{3}에서 최고 275 mg/m^{3}까지의 극히 높은 농도의 클로로필을 보이는 지점이며, R2는 0.6 ~ 4.5 mg/m^3 사이의 값을 보이는 맑은 해역의 특성을 보이는 지점이다. R3는 3 ~ 77 mg/m^3 사이의 값을 보이는, 연구지역의 유해 적조 종 번성 지역에서 중간 정도의 높은 CHL 값을 보이는 지점이다. Fig. 3의 분석결과와 마찬가지로, 일반적인 맑은 해역의 환경보다 고농도의 클로로필 분포를 보이는 R1과 R3 지점에서는 총 CHL과 microphytoplankton이 차지하는 CHL 값이 매우 유사하게 나타났으며, nano-와 pico-의 경우는 극히 낮은 값을 보이고 상대적으로 시간 별로 유의미한 변화도 나타나지 않는 것으로 분석되었다(Fig. 6(a)와 (c)). Microphytoplankton의 CHL 값은 오전에 낮은 값을 보이고 15시 25분에 최대 농도 값을 보이는 것으로 나타나, 이 역시 유해 적조 종인 *Cochlodinium polykrikoides*의 종의 상하 이동을 잘 반영한 결과로 판단된다. R2 지점에서도 역시 평균적인 맑은 해역보다 높은 농도의 CHL에서는 nano- 및 picophytoplankton의 CHL

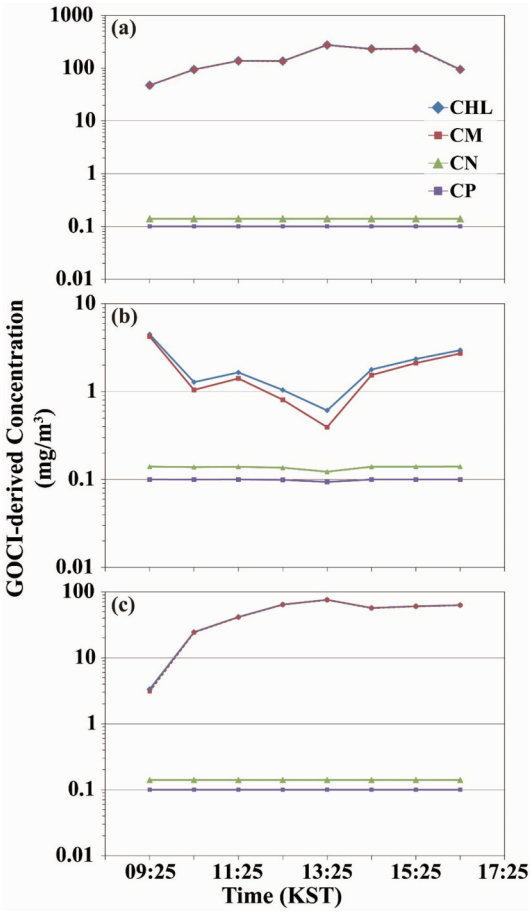

Fig. 6. GOCI-derived CHL values from hourly intervals of total CHL and each PSC at points (a) R1, (b) R2, and (c) R3 in Fig 5(a).

이 매우 낮고 시간 별 변화가 없으나, 총 CHL이 0.5 mg/m^{3}의 값 근처로 떨어지면 nano- 및 picophytoplankton의 CHL도 함께 변하는 것을 볼 수 있다(Fig 6(b)).

4. 결론 및 토의

이 연구에서는 우리나라 동해지역을 대상으로 2013년 여름 대규모 유해 적조 발생 시기에 대해, 식물성플랑크톤 크기 군집 별 CHL의 시간 별 변화를 분석하였다. 현장관측을 통해 얻어진 HPLC 자료로부터 삼성분 모델의 변수를 조정하고, 이를 GOCI CHL 영상에 적용하여 microphytoplankton, nanophytoplankton, picophytoplankton 각 식물성플랑크톤 크기별로 엽록소 농도를 추정하여 분석에 활용하였다. 추출된 삼성분 모델의 변수들을 이전 연구에서 동일한 모델을 활용하여 설정된 여러 해역 별 변수의 값과 비교한 결과, nanophytoplankton과 picophytoplankton의 최대 농도 합과 관련된 변수, C_{pn}^{m}와 총 CHL 변화량에 대한 picophytoplankton의 CHL 변화량 변수, D_p가 각각 0.24와 0.46으로 다른 해역에 비해 매우 낮은 값을 보였다. 이는 microphytoplankton에 해당하는 유해적조종이 번성한 때에 얻어진 현장 관측자료를 사용함으로써, nano-와 pico-의 농도가 상대적으로 낮은 환경을 반영한 것으로 판단된다. 모델 결과를 GOCI에 적용하여 작성된 각 PSC의 총 CHL에 대한 농도 비율 영상 분석도 유사한 결과를 보였다. Microphytoplankton의 비율은 연구지역에서 평균 80.30%인 것으로 나타났으며, 55% 이상의 픽셀에서 80 이상의 값을 보였으며, nanophytoplankton과 picophytoplankton의 비율은 각각 평균 11.26%와 8.45% 및 38%과 34.5%의 최대값을 보였다. 즉, 유해 적조 종인 *Cochlodinium polykrikoides*의 대규모 확산으로 인해 상대적으로 nano- 및 picophytoplankton의 농도가 매우 낮게 나타난 것으로 판단된다. 적조가 대규모로 번성한 2013년 8월 13일의 8개 GOCI 영상을 이용한 총 CHL과 각 PSC 별 CHL 값의 시간별 변화 분석결과, 일반적인 맑은 해역의 환경보다 고농도의 클로로필 분포를 보이는 해역에서 microphytoplankton의 CHL 값 변화가 총 CHL 변화 매우 유사하게 나타났다. Microphytoplankton의 CHL 값은 오전에 낮은 값을 보이고 15시 25분에 최대 농도 값을 보이는 것으로 나타나, 유해 적조 종인 *Cochlodinium polykrikoides*의 종의 상하 이동을 관측할 수 있었다. 그러나, nano- 및 picophytoplankton의 CHL은 극히 낮은 값을 보이고 시간 별 변화도 미미하였다. 이 연구의 결과, 큰 크기의 세포가 우점하는 매우 높은 CHL 값 환경에서 기존 삼성분 모델이 적용 가능함을 알 수 있었다. 또한 한반도 주변에서 식물성플랑크톤 크기 별 조성 분석에 GOCI 자료를 활용할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 좀 더 정확도가 높은 크기 군집 별 분석을 위해서는 맑은 해역 환경에서의 많은 현장자료의 취득이 필요할 것으로 보인다.

사사

이 연구는 한국해양과학기술원의 “생지화학 순환 및 해양환경변동 연구” 사업, 해양경찰청 R&D 과제인 “위성연계 접경수역 선박 모니터링 및 분포 예측 체계 개발” 및 해양수산부가 지원한 “독도의 지속 가능한 이용 연구” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

Ahn, J. H., Y. J. Park, W. Kim, and B. Lee, 2016. Simple aerosol correction technique based on the spectral relationships of the aerosol multiple-scattering reflectances for atmospheric correction over the oceans, *Optics Express*, 24: 29660-29670.

Ahn, J. H., Y. J. Park, W. Kim, B. Lee, and I. S. Oh, 2015. Vicarious calibration of the Geostationary Ocean Color Imager, *Optics Express*, 23: 23236-23258.

Aiken, J., S. Alvain, R. Barlow, H. Bouman, A. Bracher, B. Brewin, A. Bricaud, C. Brown, A. Ciotti, H. Claustre, L. Clementson, S. Craig, E. Devred, N. Hardman-Mountford, T. Hirata, C. Hu, T. Kostadinov, S. Lavender, C. Le Quéré, and J. Uitz, 2014. Phytoplankton functional types from Space, *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG)*, Dartmouth, Nova Scotia, CAN, p. 156.

Brewin, R. J. W., S. J. Lavender, N. J. Hardman-Mountford, and T. Hirata, 2010. A spectral response approach for detecting dominant phytoplankton size class from satellite remote sensing, *Acta Oceanologica Sinica*, 29: 14-32.

Bricaud, A., A. M. Ciotti, and B. Gentili, 2012. Spatial-temporal variations in phytoplankton size and colored detrital matter absorption at global and regional scales, as derived from twelve years of SeaWiFS data (1998-2009), *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1): 1-17

Choi, J.-K., Y. J. Park, J. H. Ahn, H.-S. Lim, J. Eom, and J.-H. Ryu, 2012. GOCI, the world’s first geostationary ocean color observation satellite, for the monitoring of temporal variability in coastal water turbidity, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 117(C9): 1-10.

Choi, J. K., J. E. Min, J. H. Noh, T. H. Han, S. Yoon, Y. J. Park, J. E. Moon, J. H., Ahn, S.M. Ahn, and J. H. Park, 2014a. Harmful algal bloom (HAB) in the East Sea identified by the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI), *Harmful Algae*, 39: 295-302.

Choi, J. K., Y. J. Park, B. R. Lee, J. Eom, J. E. Moon, and J. H. Ryu, 2014b. Application of the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) to mapping the temporal dynamics of coastal water turbidity, *Remote Sensing of Environment*, 146: 24-35.

Ciotti, A. M., M. R. Lewis, and J. J. Cullen, 2002. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient, *Limnology and Oceanography*, 47: 404-417.

Devred, E., S. Sathyendranath, V. Stuart, H. Maass, O. Ulloa, and T. Platt, 2006. A two-component model of phytoplankton absorption in the open ocean: Theory and applications, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 111(C3): 1-11.

Hirata, T., J. Aiken, N. Hardman-Mountford, T. J. Smyth, and R.G. Barlow, 2008. An absorption model to determine phytoplankton size classes from satellite ocean colour, *Remote Sensing of Environment*, 112: 3153-3159.

Hirata, T., N. J. Hardman-Mountford, R. J. W. Brewin, J. Aiken, R. Barlow, K. Suzuki, T. Isada, E. Howell, T. Hashioka, M. Noguchi-Aita, and Y. Yamanaka, 2011. Synoptic relationships between surface Chlorophyll-a and diagnostic pigments specific to phytoplankton functional types, *Biogeosciences*, 8: 311-327.

Hu, C., K. L. Carder, and F. E. Muller-Karger, 2001. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid coastal waters: A practical method, *Remote Sensing of Environment*, 75: 447-447.

Kang, Y. S., H. G. Kim, W. A. Lim, C. K. Lee, S. G. Lee, and S. Y. Kim, 2002. An Unusual Coastal Environment and Cochlodinium polykrikoides Blooms in 1995 in the South Sea of Korea, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 37: 212-223 (in Korean with English abstract).

Kim, D. W., Y. H. Jo, J. K. Choi, J. G. Choi, and H. S. Bi, 2016. Physical processes leading to the development of an anomalously large Cochlodinium polykrikoides bloom in the East sea/Japan sea, *Harmful Algae*, 55: 250-258.

Kim, Y. S., C. S. Jeong, G. T. Seong, I. S. Han, and Y. S. Lee, 2010. Diurnal vertical migration of Cochlodinium polykrikoides during the red tide in Korean coastal sea waters, *Journal of Environmental Biology*, 31: 687-693.

Lee, D. K., 2008. Cochlodinium polykrikoides blooms and eco-physical conditions in the South Sea of Korea, *Harmful Algae*, 7: 318-323.

Lou, X. and C. Hu, 2014. Diurnal changes of a harmful algal bloom in the East China Sea: Observations from GOCI, *Remote Sensing of Environment*, 140: 562-572.

Noh, J. H., W. Kim, S. H. Son, J. H. Ahn, and Y. J. Park, 2018. Remote quantification of Cochlodinium polykrikoides blooms occurring in the East Sea using geostationary ocean color imager (GOCI), *Harmful Algae*, 73: 129-137.

Park, K.-A., H.-J. Woo, and J.-H. Ryu, 2012. Spatial scales of mesoscale eddies from GOCI Chlorophyll-a concentration images in the East/Japan Sea, *Ocean Science Journal*, 47: 347-358.

Ruddick, K., G. Neukermans, Q. Vanhellemont, and D. Jolivet, 2014. Challenges and opportunities for geostationary ocean colour remote sensing of regional seas: A review of recent results, *Remote Sensing of Environment*, 146: 63-76.

Sathyendranath, S., G. Cota, V. Stuart, H. Maass, and T. Platt, 2001. Remote sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches, *International Journal of Remote Sensing*, 22: 249-273.

Son, Y. B., Y. H. Kang, and J. H. Ryu, 2012. Monitoring Red Tide in South Sea of Korea (SSK) Using the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI), *Korean Journal of Remote Sensing*, 28: 531-548 (in Korean with English abstract).

Sun, X. R., F. Shen, D. Y. Liu, R. G. J. Bellerby, Y. Y. Liu, and R. G. Tang, 2018. In Situ and Satellite Observations of Phytoplankton Size Classes in the Entire Continental Shelf Sea, China, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 123: 3523-3544.

Uitz, J., H. Claustre, A. Morel, and S. B. Hooker, 2006. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on surface chlorophyll, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 111(C8): C08005.1- C08005.24.

Vidussi, F., H. Claustre, B. B. Manca, A. Luchetta, and J.C. Marty, 2001. Phytoplankton pigment distribution in relation to upper thermocline circulation in the eastern Mediterranean Sea during winter, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 106: 19939-19956.

Yang, H., J.-K. Choi, Y.-J. Park, H.-J. Han, and J.-H. Ryu, 2014. Application of the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) to estimates of ocean surface currents, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119: 3988-4000.

Yoon, S. and H. Yang, 2016. Study on the temporal and spatial variation in cold water zone in the East Sea using satellite data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 32: 703-719 (in Korean with English abstract).