

# 인공위성에서 산출된 식물플랑크톤 특성치의 해양환경 변화 지시자로서 역할에 대한 검토: 동해 사례

## A Review on Phytoplankton Phenological Characteristics derived from Satellite Measurements as an Indicator for the Marine Ecosystem Status Assessment: the Case of the East Sea

조춘옥\* · 김현우\*\* · 강용덕\*\*

Chun Ok Jo · Hyun Woo Kim · Yong Dug Kang

**요약** 식물플랑크톤 생체량의 계절변동성과 봄철 대 증식은 보편적으로 알려져 있는 생태적 특성으로, 식물플랑크톤이 서식하는 해역의 생리·생태적 환경 특성에 따라서 그 특성이 구분된다. 최근 인공위성 해상센서를 통해서 장기간 엽록소 농도 시계열 자료의 활용이 가능해지면서, 다양한 해양생태계에서 식물플랑크톤의 생태적 특성에 대한 정의 및 해양생태계 변화를 평가하기 위한 지시자로서 그 활용 가능성이 제시되고 있다. 본 논문에서는 식물플랑크톤의 생태적 특성들을 평가하기 위해 제시되고 있는 정의들을 요약하고, 생태적 특성들의 해양생태계 변화 감지를 위한 지시자로서의 잠재성과 한계점을 검토하였다.

**키워드** 식물플랑크톤 계절변동성, 봄철 대 증식, 해양생태계 변화 지시자, 엽록소 농도, 동해

**Abstract** The seasonal variation of phytoplankton biomass and spring bloom are well-understood and widely-accepted ecological properties in the ocean. These ecological properties show a unique uni- or bimodal pattern of phytoplankton biomass which is mainly determined by physiological and ecological conditions in a marine ecosystems. Recently, with the advent of satellite remote sensing of the ocean, ocean color sensors are able to detect chlorophyll-a concentrations on a synoptic scale. The ecological properties derived from remotely-sensed chlorophyll-a have been proposed as indicators of phytoplankton for the monitoring of ecological properties and detection of ecosystem changes in the pelagic ocean. In this paper, the definitions of ecological properties proposed for indicators of phytoplankton have been summarized. We have also reviewed the potential for ecological properties as indicators for the detection of ecosystem changes in the pelagic ocean.

**Key words** Seasonal variations of phytoplankton biomass, Spring blooms, Indicators for detection of marine ecosystem changes, Chlorophyll-a, East Sea

### 1. 서론

산업혁명(18세기 중엽) 이후 인간활동에 기인한 지구온난화(global warming)는 전 세계 여러 지역에서 이상기후 현상, 해양의 온난화, 북극해빙 면적 감소와 같은 현상들을 초래하고 있다. 이와 같은 현상들은 대기-해양-육상-빙권으로 구성되어 있는 기후시스템 전반에 걸친 변화가 일어나고 있음을 시사한다. 기후시

스템의 변화는 전 세계 여러 나라의 정치, 사회, 경제 전반에 걸친 손실과 극한기후 지역의 경우는 인간의 주거지와 생존까지 위협할 수 있어 기후시스템의 변화 감지 및 예측에 대한 필요성이 증가하고 있다. 최근에서는 기후시스템 각 권별의 대표적인 기후인자들의 선별 및 기후시스템 감시를 위한 지시자로서 활용가능성에 대한 검토가 수행되고 있다. 한 예로, 미국 연방 국가기후평가개발 자문위원회(National Climate Assessment

Received: 2020.07.01, Revised: 2020.07.03, Accepted: 2020.07.03

\* (주)해양정보기술(Marine Information Technology Corp.), cojoo100@gmail.com (주저자 및 교신저자)

\*\* (주)해양정보기술(Marine Information Technology Corp.), cojoo100@gmail.com

and Development Advisory Committee)는 지난 2014년 National Climate Indicators System Report를 통해 재난대응전략 수립을 위한 기후변화 지시자들을 각 권별로 선별하여 발표하였으며, 해양권은 해빙 면적 및 범위, 해수면 높이, 해수면 온도, pH, 용존산소, chlorophyll-a (chl-a) 농도를 포함한다.

해양에서 식물플랑크톤의 생체량 및 생산력은 서식해역의 빛, 영양염, 수온 및 포식압과 같은 환경조건에 따라서 다양한 시·공간 규모의 변동성을 보이며, 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소를 흡수하여 해양 저층으로 제거(biological carbon pump)하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 특히, 지구온난화와 식물플랑크톤과의 밀접한 연관성으로 인해서 식물플랑크톤 생체량의 감소가 지구온난화가 심각해지고 있음을 반영하는 것으로 해석되기도 한다. 지난 110년간(1899-2009) 지구온난화는 해수면 온도를 전 세계 대부분의 해역에서 증가시켰고, 이로 인한 표층의 성층강화는 해양 저층의 영양염 공급 감소 및 전지구 규모에서 식물플랑크톤 생체량을 약 1%/yr의 비율로 감소시킨 것으로 추정되고 있다(Boyce et al., 2010). 그리고 이러한 변화는 식물플랑크톤 생체량 또는 생산력의 지수(index)로서 여러 해역에서 종종 사용되고 있는 광합성 색소인 chl-a 농도 자료 분석을 통해서 추정되고 있다.

식물플랑크톤의 chl-a 농도는 크게 현장(in-situ) 측정법과 원격탐사 기법을 이용하여 측정할 수 있다. 현장에서 선박을 이용하는 방법은 고비용이 소요되며 chl-a 농도를 측정할 수 있는 시·공간 범위의 제약이 크게 작용한다. 이에 반해서 인공위성의 해색센서를 이용하는 원격탐사기법은 저비용으로 광범위 해역에서 일정한 시간 간격의 chl-a 농도 자료를 획득할 수 있다. 특히, 최초의 해색센서인 Coastal Zone Color Scanner (CZCS, 1978-1986) 이후, Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS, 1997-2010), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, 2002-현재), Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS, 2012-현재) 등을 이용하여 산출된 chl-a 농도의 시계열 자료는 세계 여러 나라의 연구자들에 의해서, 10년 단위 규모의 식물플랑크톤 생체량 변화 추정에 활용되고 있다(Gregg et al., 2017).

해양생태계의 특성을 내포하고 있는 인자가 해양환경 변화 감지를 위한 지시자로서 활용되기 위해서는 그 특성이 포괄적으로 이해 및 수용되고 있으며, 정성적인 특성들에 대한 정보가 수치 단위로서 정량화될 수 있어야 한다(Platt and Sathyendranath, 2008). 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 농도 자체만으로 기후변화나 해양환경 변화에 대한 지시자로서 여러 해역을 대상으

로 적용되고 있다. 그러나 chl-a 농도는 식물플랑크톤의 성장과 손실에 영향을 미치는 생태적, 생리적 환경요인들의 영향에 의한 시·공간 변동폭이 커서, 기후변화나 해양환경변화로 인한 chl-a 농도 변화를 감지하기 위해서는 한 지역에서 최소 30년 이상의 연속된 시계열 자료의 확보가 필요한 것으로 평가되고 있다(Henson et al., 2017).

식물플랑크톤 생체량의 계절변동성은 선행 현장조사 및 해양학자들의 연구를 통해서 가장 일반적으로 알려져 있는 식물플랑크톤의 생태적 특성 중 하나이다. 특히 CZCS 이후 해색센서 자료의 이용이 가능해지면서 대양과 연안 등 다양한 해역에서 일정한 시간 간격 단위(1일 간격, 8일 간격, 월별 간격)로 생성된 chl-a 농도 시계열 자료로부터 이러한 계절 변동성이 관측되고 있다. 온대, 아열대, 열대, 극지방 등 기후학적으로 분류되는 지역에 따라서 식물플랑크톤의 계절 변동성이 뚜렷하게 구분되는 특성을 보이며(Sapiano et al., 2012), 최근에는 이러한 계절 변동성을 정량적으로 기술하기 위한 생태적 특성치들(ecological characteristics)이 다양한 해역에서 제시되고 있다(Racault et al., 2014).

본 논문은 인공위성 해색센서에서 산출된 chl-a 시계열 자료로부터 산출되어 사용되고 있는 식물플랑크톤의 계절 변동성 및 계절 변동성을 기술하는 생태적 특성치(ecological characteristics)들을 살펴보고, 이 특성치들의 기후변화 및 해양생태계 변화 감지를 위한 지시자(indicators)로서 활용 가능성 및 한계점을 토론했고자 한다. 특히, 대양의 축소판으로서 기후변화에 의한 해양생태계 반응 및 변화 감지를 위한 이상적인 해역(Lee et al., 2009)으로 평가되고 있는 동해에서 해색센서에서 산출된 식물플랑크톤 생태적 특성치들의 지시자로서 의미를 살펴보자 한다.

## 2. 식물플랑크톤 계절변동성 및 생태적 특성치

식물플랑크톤 생체량은 열대, 아열대, 온대 및 극지역 등 각 해역의 물리, 화학, 생태적 환경조건에 따라서 특징적인 계절 변동성을 보이는 것으로 알려져 있다. 온대해역의 경우에는 식물플랑크톤 생체량이 봄과 가을에 급격한 증가를 보이는 주기적인 변동성, 즉, 봄·가을 대증식(spring bloom, fall bloom)이 발생한다. 겨울에는 표층과 저층간의 활발한 수직혼합으로 인해 저층의 풍부한 영양염(질산염, 인산염, 규산염 등)이 표층으로 공급되지만, 식물플랑크톤 성장에 필요한 빛 조건의 제약으로 식물플랑크톤 성장이 제한된다. 봄이 되면서 수직혼합의 강도가 약해지면서 빛 조건의 충족

**Table 1.** Indices of spring bloom phenology proposed for the monitoring of ecological characteristics and detection of ecosystem changes in the pelagic ocean, all developed from remotely-sensed ocean color sensors

Index	Definition	References
Initiation of spring bloom	Year day when biomass rise above certain threshold value	Siegel et al. (2002), Varaga et al. (2009), Ji et al. (2010), Brody et al.(2013)
	Year day when a lower threshold percentile (e.g. 25th percentile) of annual or seasonal cumulative biomass or abundance is reached	Greve et al. (2005), Ji et al. (2010), Brody et al.(2013)
	Year day of maximum instantaneous growth rate within a defined period	Ji et al. (2010), Brody et al.(2013)
Peak timing of spring bloom	Year day with highest biomass at a defined period.	Ji et al. (2010), Brody et al.(2013)
Peak magnitude of spring bloom	The maximum biomass during the defined period.	Ji et al. (2010), Brody et al.(2013)
Duration of spring bloom	Number of days between the initiation timing and termination timing of the bloom	Greve et al. (2005), Ji et al. (2010) Brody et al.(2013)

으로 식물플랑크톤 생체량이 급격히 증가하는 대증식 (spring bloom)이 발생한다. 여름에는 표층의 강한 성층 발달로 빛 조건은 충분하지만, 상대적으로 이용 가능한 영양염 제한으로 식물플랑크톤 생체량이 낮은 것으로 해석되고 있다. 가을에는 다시 수직혼합이 활발해지기 시작하면서 저층으로부터 영양염 공급에 따른 일시적인 식물플랑크톤 생체량의 증가(fall bloom)가 나타난다. 이처럼 식물플랑크톤의 계절변동성은 서식해역의 기후학적인 특성과 밀접하게 연관되어 있어, 어떤 해역의 식물플랑크톤 계절변동성의 변화는 기후변화나 해양환경의 변화에 기인한 것으로 추론할 수 있다.

Sapiano 등(2012)은 SeaWiFS와 MODIS에서 관측된 전 세계 해양의 chl-a 농도 시계열 자료에 다항식 수식들(polynomial equations)을 적용하여 계절변동성을 정의하고, 봄과 가을 2번의 대증식이 발생하는 패턴, 1번의 봄 대증식이 발생하는 패턴, 뚜렷한 계절 변동성이 없는 패턴 등으로 그 특성을 구분하였다. 그 결과 chl-a 계절변동성으로 구분되는 지역들이 열대, 아열대, 온대 및 극지역 등 기후학적으로 구분되는 지역들과 일치하고 있음을 기술하였으며, 각 해역별 chl-a 농도의 계절변동성을 해양생태계 변화 감지를 위한 지시자로서 활용하기 위하여 지속적인 모니터링의 필요성을 강조하였다.

아열대, 온대 및 아한대 해역에서 식물플랑크톤의 생체량은 봄철 대증식 기간에 가장 뚜렷한 증가를 보인다. 봄철 대증식의 패턴은 봄철 대증식의 시작 시기, 대증식 기간 동안 생체량 최대치 도달 시기, 대증식의 크기, 대증식 지속 기간 등으로 기술되며, 이 특성들은

식물플랑크톤의 계절학적(phytoplankton phenology) 특성치로 정의되고 있다(Table 1). 그러나 이러한 특성치들은 연구자에 따라서 달리 정의되고 있으며, 정의 기준에 따라서 상이한 식물플랑크톤의 계절학적 특성치들이 산출될 수 있다. 특히 봄철 대증식 시작 시기에 대한 정의가 연구자에 따라서 가장 큰 차이를 보인다. Brody 등(2013)은 북대서양을 대상으로 연구자들에게 의해서 제시된 정의 기준에 따라서 봄철 대증식 시작 시기를 산출한 결과를 비교하였으며, 그 결과 50일 이상의 봄철 대증식 시작 시기의 차이가 발생함을 보고하였다. 따라서 어떤 해역에서 봄철 대증식 특성치들을 해양생태계 변화 감지를 위한 지시자로서 활용하기 위해서는 정의 기준에 따른 값의 변화가 가장 작거나 값에 대한 영향이 없는 특성치에 대한 검토 및 다수의 연구자들이 동의하는 정의 기준 마련이 선행되어야 할 것이다.

### 3. 동해 식물플랑크톤 계절변동성 및 봄철 대증식 특성치

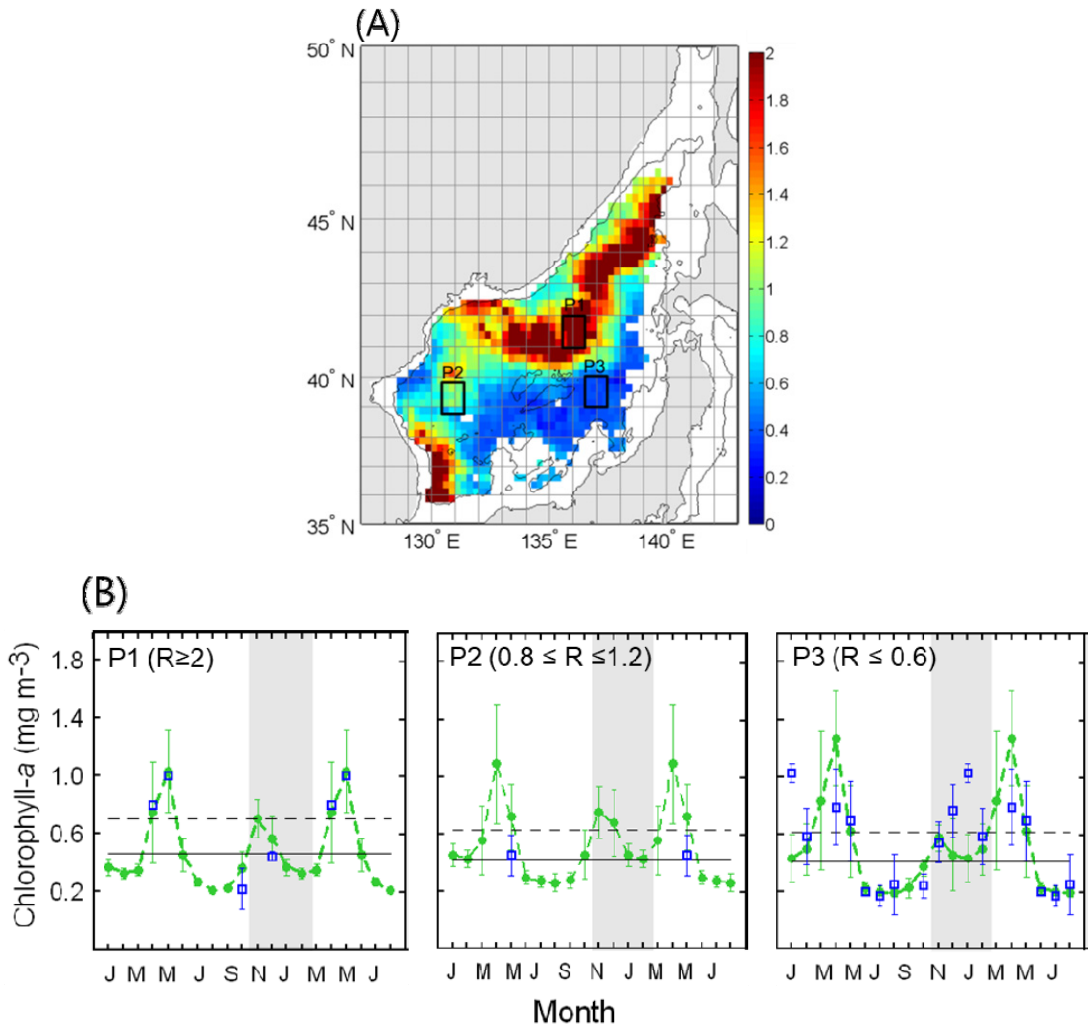
#### 3.1 동해 식물플랑크톤 계절변동성

동해는 한국, 북한, 일본, 러시아에 둘러싸여 있는 정치적으로 복잡한 해역으로 선박을 이용한 현장조사 수행이 가능한 지역 범위가 제한되어 있다. 이러한 이유로 동해의 생태적 특성 이해 및 생태계 변화 감지 방안으로서 해상센서를 이용한 chl-a 농도의 시·공간 변화 모니터링은 무엇보다 중요한 접근법이 될 수 있다(Ishizaka and Yamada, 2019).

Kim 등(2000)은 동해 전 해역을 대상으로 chl-a와

phaeopigments를 포함하는 CZCS 식물플랑크톤 색소 농도의 계절변동성 분석을 통해서 식물플랑크톤 봄과 가을 대증식 발생 및 동해 극전선(약 38-40°N) 이남의 해역(울릉분지와 야마토 분지)에서 북쪽 해역(일본분지)보다 약 1달 빠른 봄 대증식의 발생을 보고하였다. CZCS 이후 SeWiFS와 OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner), MODIS, GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) 해색센서를 통해서도 동해 극전선 이남의 해역에서 약 1달 빠른 봄 대증식의 발생이

보고되고 있다(Yamada et al., 2004; Jo et al., 2014). 극전선 이남의 해역과 북쪽 해역은 물리적 특성에 따라서 아열대 해역(subtropical regions)과 아한대 해역(subpolar regions)으로 정의되며, 북쪽 해역과 비교해서 남쪽 해역에서의 약 1달 이상 빠른 표층에서의 성층 발달, 혼합층 수심(Mixed Layer Depth, MLD)의 얕아짐, 표층 수온 증가 등으로 봄철 대증식 발생시기의 차이가 설명되고 있다(Kim et al., 2000; Yamada et al., 2004; Kim et al., 2007).



**Figure 1.** (A) Ratio ( $R$ ) of the variance at the 6-month period over that at the 12-month period derived from the Global Wavelet Power Spectrum (GWPS) applied to SeaWiFS chl- $a$  data from 1998 to 2007 in each grid of  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . The squares (P1, P2, P3) denote selected  $1^\circ \times 1^\circ$  areas representing the areas with the most number of in-situ observations available. (B) Monthly-mean chl- $a$  concentrations (green dotted lines) obtained from the ten-year time series at P1, P2, and P3. Solid and dotted black lines indicate the annual mean and 1.5 times the annual mean, respectively. Blue squares are the monthly values of all in-situ measurement data available for P1, P2, and P3.

동해 식물플랑크톤의 봄과 가을 대증식은 앞서 기술된 선행 연구들을 통해서 여러 연구자들에게 일반적인 동해의 생태적 특성으로 받아들여지고 있다. 최근에는 동해의 봄과 가을 대증식의 발생으로 정의되는 식물플랑크톤의 계절변동 특성이 크게 3가지 패턴으로 세분화될 수 있음이 보고되었다(Jo et al., 2014). Jo 등(2014)은 SeaWiFS의 10년간 관측된 chl-a 시계열 자료에 wavelet 분석을 적용하여 6개월과 12개월 주기의 chl-a 농도 변동량(variance)의 비(R)를 구함으로서 봄과 가을 대증식의 발생이 뚜렷한 패턴(stable bimodal pattern), 봄 대증식과 비교해서 가을 대증식의 크기가 상대적으로 약하여 비주기적으로 발생하는 특성을 보이는 패턴(unimodal pattern), 이 두 가지 패턴의 중간 단계의 특성을 보이는 패턴(transitional weak bimodal pattern)으로 구분하였다(Fig. 1). 또한 3가지 패턴의 공간분포를 통해 동해 지역별 식물플랑크톤 생체량의 계절변동성의 차이를 규명하였으며, 이 지역들은 동해의 해저지형 및 표층 해류 순환 시스템과 표층 수온 분포에 따라서 구분되는 지역들과 일치함을 보고하였다. Chl-a 계절변동 특성으로 구분되는 지역들과 물리-지형적 특성으로 구분되는 지역들의 밀접한 연관성은 기후변화에 따른 동해 해양생태계 변화 감지를 위한 지시자로서 chl-a 농도의 계절변동성의 활용 가능성을 보여준다.

### 3.2 동해 봄철 대 증식의 특성치

동해에서 식물플랑크톤 봄철 대증식은 chl-a 농도의 급격한 증가로 기술되며, 몇 가지 기준에 따라서 봄철 대증식의 발생 시작 시기가 정의되고 있다(Yamada et al., 2004; Jo et al., 2007; Jo, 2013; Park et al., 2014). Yamada 등(2004)은 겨울철 동해 전 지역의 chl-a 평균 농도의 2배인 0.8mg m<sup>-3</sup> 이상 증가하기 시작하는 시기를 봄철 대증식 시작 시기로 정의하였으며, 봄철 대증식 시작 시기의 연 변동은 성층형성 시기의 연변동과 양의 상관관계가 있음을 기술하였다. 후속 연구에서는 봄철 대증식 시기와 성층형성 시기의 양의 상관관계 및 과거 성층형성 시기 자료를 활용하여 십년주기의 봄철 대증식 시기의 변화를 추정하였다(Yamada and Ishizaka, 2006). Jo 등(2007)은 동해의 각 지역별 겨울철 평균 농도가 2배 이상 증가하기 시작하는 시기를 봄철 대증식 시작 시기로 정의하였으며, Park 등(2014)은 로그 스케일(log scale)에서 chl-a 농도가 최대치에 도달하는 시기를 봄철 대증식 시작 시기로 정의하였다. 그러나, Jo(2013)의 분석에 따르면 동해 및 타 해역에서 제시된 봄철 대증식 시작 시기의 정의들을 적용할 경우, 정의 기준에 따라서 약 30~40일 정도

의 봄철 대증식 시작 시기의 차이가 발생한다. 한 예로, 동해 북쪽에 위치한 지역(Fig. 1B)의 chl-a 농도에 Jo 등(2007), Yamada 등(2004), Park 등(2014)의 기준을 적용할 경우, 각각의 기준에 따라서 봄철 대 증식은 3월, 4월, 5월에 시작하는 상이한 결과가 도출된다. 특히 Park 등(2014)의 정의 기준에 따라 결정된 5월은 식물플랑크톤 생체량이 최대치에 도달하는 봄철 대증식의 성숙기에 도달하는 시기이다.

봄철 대증식 시작 시기의 정의에 따른 차이뿐 아니라 봄철 대증식 발생 시기의 연도별 변동 폭 또한 큰 것으로 보고되고 있다. Jo(2013)의 분석에 따르면 동해 남쪽 지역의 1998년부터 2007년 동안 chl-a 시계열 자료에 동일한 봄철 대 증식 시작 시기에 대한 정의를 적용하더라도 봄철 대증식 시작 시기는 50일 이상의 변동 폭을 보이는 것으로 나타난다. 따라서 봄철 대증식 시작 시기를 동해 해양생태계 변화 감지를 위한 지시자로서 활용하기 위해서는 최소 10년 이상의 장기간에 걸친 봄철 대증식 시작 시기에 대한 자료의 확보가 필요하다.

식물플랑크톤의 봄철 대증식을 정의하고 그 변화를 분석하기 위해서는 봄철 대증식 발생 시작 시기뿐 아니라 대증식 기간 동안 생체량 최대치 도달 시기, 대증식의 크기, 대증식 지속 기간 등 다른 계절학적 특성치들에 대한 정의가 동반되어야 한다(Table 1). 동해에서는 봄철 대증식 발생 시작 시기 정의에 대한 몇몇 연구자들의 노력이 있었으나, 다른 특성치들에 대한 정량적인 기준을 정의한 연구 사례는 거의 전무한 상황이다(Jo, 2013). 다른 해역에서 제안된 봄철 대 증식 특성치들에 대한 정의를 동해에 적용하는 것도 하나의 방안이 될 수 있으나, 각 해역의 특징적인 chl-a 농도의 계절변동성 및 연변동성이 반영된 정의 기준을 동해에 직접 적용하기에는 한계가 있다. 특히 동해는 대양에서 나타나는 다양한 물리적 현상(physical processes)들이 나타나며, 물리적 현상과 함께 chl-a 농도의 시·공간 변동성 또한 역동적인 특성을 보인다(Ashjian et al., 1994). 따라서 동해 chl-a 농도의 변동 특성이 반영된 식물플랑크톤 계절학적 특성치를 기술하기 위한 적합한 기준들에 대한 여러 연구자들 간의 토론과 합의가 시급하다.

## 4. 결론

지구온난화 및 이로 인한 해양생태계 변화에 대한 징후들이 여러 해역에서 감지되고 있으며, 이러한 변화를 정량적으로 감지하기 위한 지시자로서 식물플랑크톤 생체량의 계절변동성과 봄철 대증식을 기술하는

특성치에 대한 활용 가능성이 연구자들에 의해서 제시되고 있다.

식물플랑크톤 생체량의 계절변동성과 봄철 대 증식은 여러 해역에서 가장 보편적으로 수용되고 있는 특성으로, 식물플랑크톤이 서식하는 해역의 생리·생태적 환경 특성에 따라서 특징적인 시·공간 변동성을 보인다. 따라서 다양한 해역에서 생태계 변화의 모니터링이 가능한 지시자로서 그 활용 가치가 높을 것으로 기대된다. 1970년대의 CZCS 이후 여러 해색센서를 통해서 제공되고 있는 다양한 시·공간 규모의 chl-a 자료의 누적은 이러한 지시자로서의 활용을 가능하게 하고 있으며, 여러 연구자들을 통해서 다양한 해역에서의 식물플랑크톤의 계절학적 특성치들을 정량적으로 정의하기 위한 노력들이 진행되고 있다. 그러나 이러한 노력이 있음에도 표준치로서 활용될 수 있는 식물플랑크톤 특성치들에 대한 정의가 여전히 부재되어 있다. 또한 연구자에 따른 다양한 정의들이 혼재되어 해양생태계 변화를 평가하기 위한 지시자로서 사용되고 있어, 정의 기준에 따른 해양생태계 현황에 대한 상이한 평가 결과 도출 가능성도 배제할 수 없을 것이다. 따라서 기후변화 및 해양생태계 변화를 평가하고 지속적으로 모니터링하기 위해서는 각 해역에서의 식물플랑크톤의 생태적 특성치들을 표준치로 정량화하기 위한 노력이 무엇보다 시급한 현안으로서 다뤄져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업(No. 2016R1D1A1B03931170)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Ashjian, C., Arone, R., Davis, C., Jones, B., Kahru, M., Lee, C., and Mitchell, B.G., 2006. Biological structure and seasonality in the Japan/East Sea. *Oceanography*, 19, 122-133.
- Boyce, D.G., Lewis, M.R., and Worm, B., 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 466:591-596.
- Brody, S.R., Lozier, M.S., and Dunne, J.P., 2013. A comparison of methods to determine phytoplankton bloom initiation. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1002/jgrc.20167.
- Gregg, W.W., Rousseaux, C.S., and Franz, B.A., 2017. Global trends in ocean phytoplankton: a new assessment using revised ocean colour data. *Remote Sensing Letters*, 8(12):1102-1111.
- Henson, S.A., Cole, H.S., Hopkins J., Martin A.P., and Yool A., 2017. Detection of climate change-driven trends in phytoplankton phenology. *Global Change Biology*, 24(1):e101-e111.
- Ishizaka, J. and Yamada, K., 2019. Phytoplankton and Primary Production in the Japan Sea. *Remote Sensing of the Asian Seas*. In: Barale V., Gade M. (eds) *Remote Sensing of the Asian Seas*. Springer, Cham (10.1007/978-3-319-94067-0\_9).
- Ji, R., Edwards, M., Mackas, D., Runge, J., and Thomas, A. 2010. Marine plankton phenology and life history in a changing climate: current research and future directions. *Journal of Plankton Research*, 32(10), 1355.
- Jo, C.O., 2013. Spring phytoplankton bloom variability and implications for carbon flux in the East/Japan Sea. Doctoral thesis, Seoul National University.
- Jo, C.O., Lee, J.Y., Park, K.A., Kim, Y.H., and Kim, K.R., 2007. Asian dust initiated early spring bloom in the northern East/Japan Sea. *Geophysical Research Letters*, 34(5).
- Jo, C.O., Park, S., Kim, Y.H., Park, K.A., Park, J.J., Park, M.K., Li, S., Kim, J.Y., Park, J.E., Kim, J.Y., and Kim, K.R., 2014. Spatial distribution of seasonality of SeaWiFS chlorophyll-a concentrations in the East/Japan Sea. *Journal of Marine Systems*, 139:288-298 (<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.07.004>).
- Kim, S.W., Saitoh, S.I., Ishizaka, J., Isoda, Y., and Kishino, M., 2000. Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentrations in the Japan sea derived from CZCS images. *Journal of Oceanography*, 56(5):527-538.
- Kim, H.C., Yoo, S.J., and Oh, I.S., 2007. Relationship between phytoplankton bloom and wind stress in the sub-polar frontal area of the Japan/East Sea. *Journal of Marine Systems*, 67(3-4):205-216.
- Lee, J.Y., Kang, D.J., Kim, I.N., Rho, T., Lee, T., 2009. Spatial and temporal variability in the pelagic ecosystem of the East Sea (Sea of Japan): a review. *Journal of Marine Systems* 78:288-300.
- Park, K.A., Kang, C.K., Kim, K.R., and Park, J.E., 2014. Role of sea ice on satellite-observed

- chlorophyll-a concentration variations during spring bloom in the East/Japan sea. *Deep-Sea Res I*, 83:34-44.
15. Platt, T. and Sathyendranath, S., 2008. Ecological indicators for the pelagic zone of the ocean from remote sensing, 112:3426-3436.
  16. Racault, M.F., Platt, T., Sathyendranath, S., Ađırbař, E., Vicente, V.M., and Brewin, R., 2014. Plankton indicators and ocean observing systems: support to the marine ecosystem state assessment. *Journal of Plankton Research*, 36:621-629.
  17. Sapiano, M.R.P., Brown, C.W., Schollaert, S., and Vargas, M., 2012. Establishing a global climatology of marine phytoplankton phenological characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 117, C08026 (<https://doi.org/10.1029/2012JC007958>).
  18. Siegel, D.A., Doney, S.C., Yoder, J.A., 2002. The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis. *Science*, 296, 730-733.
  19. Vargas, M, Brown, C.W., and Sapiano, M.R.P., 2009. Phenology of marine phytoplankton from satellite ocean color measurements. *Geophysical Research Letters*, 36, L01608, doi:10.1029/2008GL036006.
  20. Yamada, K. and Ishizaka, J., 2006. Estimation of inter-decadal change of spring bloom timing, in the case of the Japan Sea. *Geophysical Research Letters*, 33(2) (<https://doi.org/10.1029/2005gl024792>).
  21. Yamada, K., Ishizaka, J., Yoo, S., Kim, H. C., and Chiba, S., 2004. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES). *Progress in Oceanography*, 61(2-4):193-211.