

정지궤도 해색탐재체(GOCI) 자료 활용을 위한 황해의 일차생산력 추정방법 비교

박지수[†] · 유신재

한국해양연구원 해양생물자원연구본부

Comparison of Estimation Methods of Primary Production of the Yellow Sea for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) Data

Jisoo Park[†] and Sinjae Yoo

Marine Living Resources Research Department, KORDI

Abstract : To estimate marine primary production, satellite data are essential for providing much better spatial and temporal resolutions. However, primary production estimation for turbid coastal water such as the Yellow Sea still needs much improvement. Here we evaluate currently available methods of primary production estimation in the Yellow Sea. We focus on comparison of eight combinations from four chlorophyll-a algorithms and two primary production algorithms of the Yellow Sea. Estimated primary production by the eight combinations ranged from 96.5 to 610.2 gC m⁻² yr⁻¹ in the central region of the Yellow Sea. The new chlorophyll algorithms (presently under development by Korea, China, and Japan scientists) are expected to improve the retrieval of chlorophyll-a in turbid regions compared to the standard algorithm but there are certain unresolved problems. The new algorithm for primary production (which uses adjusted physiological parameters with in-situ data) also needs further improvement.

Key Words : chlorophyll-a, primary production, Yellow Sea, GOCI.

요약 : 해양의 일차생산 측정에 있어 인공위성자료의 활용은 연구선 등을 활용한 기존 조사방법이 갖고 있는 시·공간상의 제한을 많이 개선할 수 있다. 하지만, 황해와 같이 탁한 해역에서의 일차생산 추정은 해수의 광학특성에 의해 여전히 많은 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 현재 수준에서 가용한 황해의 일차생산 추정방법들을 비교 평가하였다. 즉, 네 가지의 엽록소-a 추정 알고리즘과 두 가지의 일차생산 추정 알고리즘을 사용하여 각기 다른 조합들이 일차생산 추정에 있어 어떤 차이를 보이는지 알아보았다. 여덟가지 조합에 의해 추정된 황해 중부의 일차생산력은 96.5 에서 610.2 gC m⁻² yr⁻¹의 범위값을 가졌다. 최근 한·중·일 연구자들에 의해 공동으로 개발 중인 새로운 엽록소 알고리즘은 탁한 해역에서 표준알고리즘이 잘 맞지 않는 문제를 일부 해결했으나 여전히 해결해야 할 문제를 남겼다. 실측 광합성 매개변수를 새로 적용한 일차생산 추정 알고리즘 또한 개선이 필요하다.

접수일(2010년 4월 1일), 수정일(1차 : 2010년 4월 10일, 2차 : 4월 15일), 게재확정일(2010년 4월 15일).

[†] 교신저자: 박지수(jspark@kordi.re.kr)

1. 서론

황해는 한반도와 중국대륙에 둘러싸여 남쪽으로 양자강과 제주도를 연결하는 선을 경계로 하고 있는 반 폐쇄성 수역으로서 그 크기는 동서간이 약 700 km, 남북간이 약 1000 km 정도이다(Fig. 1). 황해의 면적은 발해만(Bohai Sea)을 제외하면 약 404,000 km² 정도이

며, 평균 수심은 44 m 정도로 매우 낮은 편이고 가장 깊은 중부도 100 m 정도이다. 황해는 특히 조차가 크기로 유명하며, 강한 조류의 영향으로 수심이 얇은 연안해역은 일년 내내 바닥까지 혼합층이 발달하여 연중 탁도가 매우 높은 것으로 알려져 있다. 계절적인 영향으로 여름에 집중되는 강우에 의해 동쪽의 한국연안과 남서쪽의 양자강 입구로부터 많은 부유물을 동반한 담수의 유입

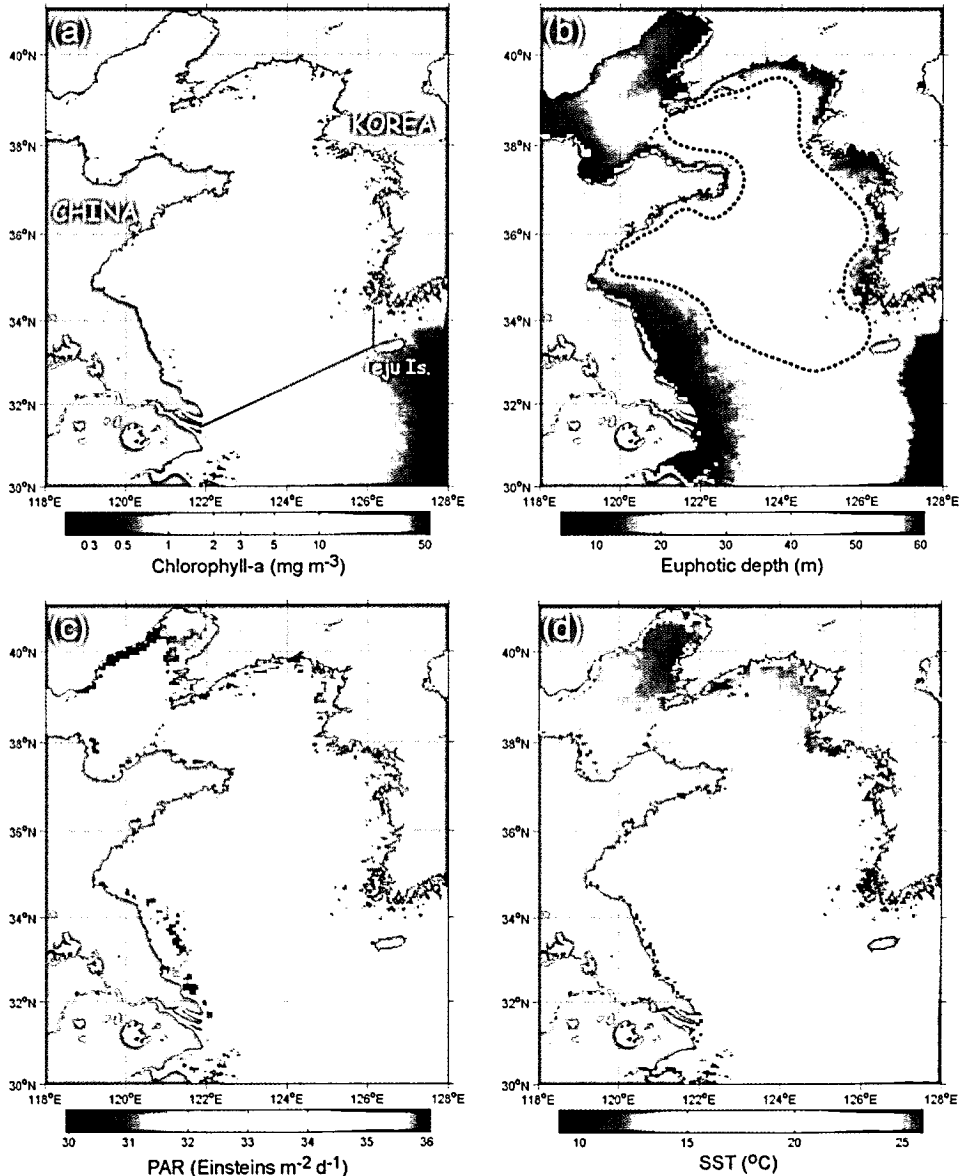


Fig. 1. Climatology of (a) chlorophyll-a concentration (mg m^{-3}), (b) euphotic depth (m), (c) PAR, and (d) Sea Surface Temperature (SST) in the Yellow Sea from 1998 to 2007. Note that SeaWiFS OC2v4 standard algorithm was used for chlorophyll-a concentration. Euphotic depth was calculated from k490. Red line indicates the southern boundary of the Yellow Sea (in the A panel). Dotted line represents relatively clear region where the k490 was less than 0.2 m^{-1} (in the B panel).

이 이루어진다. 봄철엔 약한 바람과 강한 입사광에 의해 표층수온이 상승하며 이로 인한 중부지역부터 수괴의 성층화가 이루어지고, 여름철로 접어들며 성층화된 해역이 바깥쪽으로 더 넓어진다(Xia *et al.*, 2006). 이러한 성층화로 인해 엽록소최대층(Subsurface Chlorophyll Maximum; SCM)이 발달하며, 봄과 가을철 두 번의 식물플랑크톤 번성이 일어나는 온대성 기후 지역의 특징을 갖고 있다.

광합성과 화학합성에 의해 식물이 무기물을 유기물로 바꾸는 생산을 일차생산 또는 기초생산이라 하며, 단위시간 동안 생성된 총 유기물질의 양을 일차생산(primary production; PP)이라 부른다. 광합성을 하는 해양생물은 지구 전체 식물 생물량의 약 1% 밖에 차지하지 않지만 해양 생태계의 일차생산력은 지구 전체 생산력의 약 40%를 차지하는 것으로 알려져 있다(Falkowski, 1994). 이들 생산자에 의한 기초생산은 차 상위 단계 소비자의 생산력에 직접적인 영향을 주며 궁극적으로 어류 생산력을 조절할 수 있기 때문에 합리적인 수산자원 관리와 보존을 위해서도 일차생산력은 반드시 알아야 할 중요한 기초자료이다.

황해는 계절에 따른 평균 입사량의 변화와 함께 수온

및 탁도 등의 환경변화의 폭이 매우 크기 때문에, 일차생산력도 시간 및 장소에 따라 매우 큰 차이를 보이고 있는데, 최소 11.8 mgC m⁻² d⁻¹ (5월; Wu *et al.*, 1995)에서 최대 3,175 mgC m⁻² d⁻¹ (4월; Cho *et al.*, 1994)의 조사결과가 보고된 바 있다. 실측자료에 의한 황해의 연 평균 일차생산력은 자세히 알려진 바 없으나 최중기 외(1988)에 의해 한반도 연안해역에서 최소 81 gC m⁻² yr⁻¹에서 최대 214 gC m⁻² yr⁻¹로 추정되었으며, 정경호 와 박용철(1988)은 경기만에서 320 gC m⁻² yr⁻¹을 보고한 바 있다. 또한, Nishimura (1983)는 동중국해를 포함하는 황해전역의 연 평균 일차생산력을 150~200 gC m⁻² yr⁻¹로 추정하였다. 여러 실측자료들을 종합한 황해 전체의 연 평균 일차생산력은 200 gC m⁻² yr⁻¹ 수준이지만 조사자료의 시·공간상의 제한으로 인해 정확한 예측이 쉽지 않다.

과거 수십 년 동안 황해에서 조사된 일차생산력 측정결과를 Table 1에 요약하였다. 여기서, Nishimura (1983)의 결과는 그 전 시기의 문헌들을 종합한 결과이다. 나머지 조사결과는 대부분 한반도의 서해연안에서 이루어진 관측결과이며, 일부는 중국측의 배타적 경제 수역과 북한해역을 제외한 황해 동남부 해역의 조사결

Table 1. Historical daily and annual primary production values in the literature. The values in the parentheses are mean values. Units are mgC m⁻² d⁻¹ for daily and, gC m⁻² yr⁻¹ for yearly

Year	Month													Region	References
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Yearly		
													150-200	Yellow Sea	Nishimura, 1983
1986						75-366						(320) ^a (86-87 year)	Middle coast ^a Kyungi Bay	최중기, 1991 ^a 정창수 외, 1991	
1987				333-1479 (611)		726-2844 (1348)		397-1170 (749)		320-1223 (545)		71-259 (181)	81-214 (141)	coast	최중기 외, 1988
1989						291-530 (362)		197-708		94-184			(132)	Middle coast	강연식 외, 1992
1990		37-193						303-1104		78-1009				Middle coast	강연식 외, 1992
1991				84-3175 (732)				320-1200 ^b						Front of Jin-do bcentral region	Cho <i>et al.</i> , 1994 ^b 정창수 외, 1991
1992						12-425 (197)				65-927 (331)	147-2694 (740) ^c			Central area	Wu <i>et al.</i> , 1995 ^c Choi <i>et al.</i> , 1995 (Sep.-Oct.)
1994								1324						Middle coast	유와신, 1995
1995	28-197 (108)													Middle coast	유와신, 1995
1997		11-335 (95)		120-2360 (872)				273-2359 (890)		81-1422 (661)				Eastern area of the YS	조성환, 2005
1998													(265)	Bohai Sea	Tang <i>et al.</i> , 2003

과를 보여주고 있다. 일 일차생산력의 최대값은 1987년 6월 관측결과에서 평균 $1,348 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 나타났다, 대체로 봄-가을에 높고 겨울철에 낮았으며, 여름철은 봄, 가을과 비슷한 수치지만 다소 낮았다. 또한, 결과에서 알 수 있듯이, 황해의 일 일차생산력은 계절에 따른 변이와 함께 같은 시기의 관측결과 내에서도 정점에 따른 변이가 매우 컸다.

이러한 시·공간상의 단점을 극복하기 위해서 최근 위성자료가 일차생산력 추정을 위해 사용되기 시작하였다(Longhurst *et al.*, 1995; Antonine *et al.*, 1996; Field *et al.*, 1998; Treguer and Pondaven, 2002). Son *et al.* (2005)은 황해에서 처음으로 위성자료를 이용하여 황해 전역의 일차생산력을 계산하였는데 5월과 9월의 추정치는 각각 $554 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $946 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었다. 하지만, 이 결과는 계산에 사용된 겨울철 현장자료가 없고 황해를 광학적 관점이 아닌 물리적 관점으로 나누어 접근했기에 여전히 개선해야 할 점이 많이 남아있다. 황해는 위성자료에 의한 표층 엽록소-a 농도가 전 세계에서 가장 높은 (연안 및 대륙붕 지역으로 용승과 담수의 유입이 큰) 범주에 속하는 해역으로 분류된다(Hardman-Mountford *et al.*, 2008). 최근 Sherman and Hempel (2009)은 위성자료를 이용하여 전 세계 64개 Large Marine Ecosystem (LME) 해역의 기초생산을 추정하였는데, 이중 황해는 $600 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 정도로 추정되어 상당히 높은 값을 나타내고 있으나 실측자료들과 비교할 때 2 배 이상 높은 수치이다. 따라서, 이러한 상이한 결과가 나오는 이유를 이해하는 것이 중요하다. 일반적으로 일차생산 추정에 있어 가장 큰 영향을 주는 변수는 첫째 엽록소-a, 둘째 광합성 매개변수로 알려져 있다(Behrenfeld and Falkowski, 1997).

위성자료의 엽록소-a 농도 산출을 위한 알고리즘은 주로 대양에서 얻어진 실측자료를 토대로 개발되었기 때문에 황해와 같이 용존유기물과 부유무기물이 풍부한 해역(Yoo and Park, 1998)에서는 엽록소-a 농도의 과대추정이 발생하게 된다(문정언 외, 2010 논문의 Fig. 3). 문정언 외(2010)의 연구결과를 살펴보면, 실측 엽록소-a 농도와 SeaWiFS 표준알고리즘(OC4v4; O'Reilly *et al.*, 1998, 2000)에 의해 계산된 위성 엽록소-a 자료 사이의 Root Mean Square Error (RMSE)

는 0.30으로 높았고 실측자료에 비해 위성자료가 대부분 과대추정 되었다. 이러한 이유로, 한-중-일 3국의 연구자들이 모여 각각 실측자료와 위성자료의 비교자료를 모아 황해와 동중국해에 가장 적합한 엽록소-a 알고리즘을 개발하기 위해 노력중이며 이들 과정의 중간물로 현재 Yellow Sea Ocean Color 알고리즘(가칭 YOC)와 SeaWiFS-tuned YOC 알고리즘(가칭 TYOC)이 나와 있다(Siswanto *et al.*, 2010). 실제로 문정언 외(2010)의 결과에서, YOC 알고리즘에 의해 추정된 엽록소-a 농도와 실측자료 사이의 RMSE는 0.23으로 낮아짐을 보여주고 있다.

우리나라에서는 2010년 상반기 발사 예정인 통신해양기성위성(COMS)에 세계 최초 정지궤도 해상위성센서인 Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)를 탑재 할 예정이며, 이 GOCI 센서는 SeaWiFS 등 기존 극궤도 해상위성들보다 공간 해상력도 4배 가량(한 픽셀당 약 $500\text{m} \times 500\text{m}$) 높다. 또한, 하루 8회의 관측으로 구름 등에 의해 관측이 제한되는 영역을 많이 줄일 수 있어 보다 많은 정보를 제공받을 수 있는 것이 큰 장점이다. 따라서, 위성자료 활용을 위한 보다 나은 일차생산력 추정 알고리즘의 개발이 어느 때보다 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 SeaWiFS 표준, YOC, TYOC, 그리고 GOCI 알고리즘(현재 개발중인 경험적 알고리즘; 문정언 외, 2008)까지 4개의 엽록소-a 알고리즘과 2개의 일차생산 알고리즘을 적용하여 각기 다른 조합들이 일차생산 추정에 있어 어떤 차이를 보이는지 알아보고자 한다.

2. 재료 및 방법

황해의 일차생산력 계산에 사용된 위성자료는 미국 National Aeronautics & Space Administration (NASA)의 Goddard Space Flight Center (McClain *et al.*, 1998)에서 얻어진 레벨-3 Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) 자료(data version 5.2)를 사용하였다. 사용된 변수는 엽록소-a 농도 외에 k490(490 nm에서의 소광계수), Photosynthetically Available Radiation (PAR)과 5개 채널(412, 443, 490, 510, 555 nm)의 정규 수출복사량(normalized

water-leaving radiance) 자료였다. 자료들의 공간해상도는 한 픽셀 당 약 $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ 이고, 한 달 평균자료를 사용하였다. 분석에는 1998년 1월부터 2007년 12월까지의 10년(120개월) 자료를 사용하였다. 이 밖에, 표층수온(Sea Surface Temperature; SST)자료로 NASA Jet Propulsion Laboratory/Caltech에 있는 Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC)로부터 레벨-3 AVHRR 자료를 획득해 사용하였다. 공간-시간 해상도 및 분석에 사용된 자료의 시기는 SeaWiFS 자료와 같았다.

수주의 일차생산력은 Vertically Generated Production Model (VGPM; Behrenfeld and Falkowski, 1997)과 Yellow Sea VGPM (YSVGPM; Yoo *et al.*, 2008)을 사용하여 계산하였다. VGPM과 YSVGPM은 기본적으로 같은 형태의 모델로서 표층수온을 이용한 광합성 효율 추정과 표층광량, 엽록소 농도, 낮의 길이를 통하여 일차생산력(PP)을 추정하는 모델이며, 아래의 식으로 표현된다.

$$PP_{eu} = 0.66125 \times P_{opt}^B \times \left[\frac{E_0}{E_0 + 4.1} \right] \times Z_{eu} \times C_0 \times DL$$

여기서, PP_{eu} 는 유광층까지의 수주 내 일차생산력, P_{opt}^B 는 수주 내 최대 광합성수율로 표층수온의 함수이며, E_0 는 표층의 PAR, Z_{eu} 는 유광층 수심, C_0 는 표층엽록소 농도, DL 은 낮의 길이를 나타낸다. VGPM을 이용한 일차생산력 계산을 위해서는 이와 같이 네 가지 변수(P_{opt}^B , E_0 , Z_{eu} , C_0)와 낮의 길이를 알아야 한다. 낮의 길이는 해당지역의 위도와 태양고도의 연중변화의 관계식으로부터 계산할 수 있으며 나머지 네 변수는 모두 위성자료로부터 얻을 수 있는데, 광합성 매개변수 P_{opt}^B 와 유광층수심 Z_{eu} 은 각각 표층수온자료와 k490으로부터 계산된다. YSVGPM은 여기서 광합성 매개변수 P_{opt}^B 를 새로이 추정된 모델로서 1994년부터 2001년까지의 실측자료를 이용해 광합성매개변수를 일부 개선한 모델이다 (Yoo *et al.*, 2008).

위의 식에서 일차생산력 추정에 있어 가장 큰 불확실성을 갖는 변수는 P_{opt}^B 와 C_0 두 가지이다. 본 연구에서는 황해의 일차생산력 추정에 있어 첫째, 네 가지 엽록소 알고리즘을 적용한 경우의 차이를 비교하고, 둘째, 광합성 매개변수 P_{opt}^B 의 적용에 따른 일차생산력 추정치 결과값이 어떻게 달라지는지를 비교하기 위해

VGPM을 사용한 일차생산력 VGPMPP와 YSVGPM을 사용한 일차생산력 YSVGPMPP를 계산하였다.

3. 결과

Figure 1은 일차생산 산정에 필요한 입력자료 중 네 가지 위성자료(엽록소-a, 유광층 수심, 표층 일사량, 표층 수온)의 1998년 1월부터 2007년 12월까지 십 년 동안의 전체 평균분포를 보여주고 있다. SeaWiFS 표준알고리즘(OC4v4)에 의한 엽록소-a 농도는 중국 발해만과 장강 북동부 해역에서 $\sim 10 \text{ mg m}^{-3}$ 에 이르는 높은 값이 넓게 나타나고 한국과 북한의 서해연안 가까이 마찬가지로 높은 값이 분포한다. 황해 중부는 연평균 1 mg m^{-3} 안팎의 분포를 보여주며 제주도 남동쪽 대마난류 해역에서 최소값이 나타난다(Fig. 1a). 유광층 수심은 중부해역에서 연평균 최대 40 m 부근의 값을 나타내며, 엽록소 농도가 높았던 연안해역에선 20 m 보다 얕다(Fig. 1b). 그림에서, 점선으로 표시한 해역은 연 평균 k490이 0.2 m^{-1} 보다 작은 해역으로 계절적으로 성층이 발생하는 해역과 비슷하다. 표층 일사량은 대체로 황해 전체에 연평균 $33 \text{ Einsteins m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 수준이며, 연안해역은 구름의 양이 많아 다소 높거나 낮은 불규칙한 형태를 보여주고 있다(Fig. 1c). 연평균 표층수온은 황해를 남-북으로 나눌 때 북쪽은 15도 이하, 남쪽은 15도 이상의 분포를 보여주고 있다(Fig. 1d).

Figure 2(1~6월)와 3(7~12월)은 표준알고리즘을 사용한 SeaWiFS 엽록소-a 농도와 nlw555의 월간 분포를 함께 보여주고 있다. 1998년부터 2007년까지 십 년 자료의 평균치이며, 엽록소-a 농도는 편의상 20 mg m^{-3} 까지 표현하였으나 일부 지역(검붉은색 영역)은 이보다 높은 값이 나타나기도 한다(Fig. 2a, 3a). 앞서 Fig. 1b에서 보여준 탁한 해역은 계절에 상관없이 연중 높은 농도가 나타나고 있으며, 상대적으로 맑은 중부해역도 겨울철엔 강한 혼합으로 인한 부유물질에 의해 엽록소 농도가 높게 나타나고 있다. 즉, 1-3월과 11-12월 중부의 엽록소-a 농도는 식물플랑크톤의 봄 번성이 발생하는 4월의 농도와 크게 다르지 않아 계절변화가 뚜렷이 나타나지 않고 있다. 이 결과를 통해 앞서 서론에서 밝힌 바와 같이 표준알고리즘에 의한 황해의 엽록

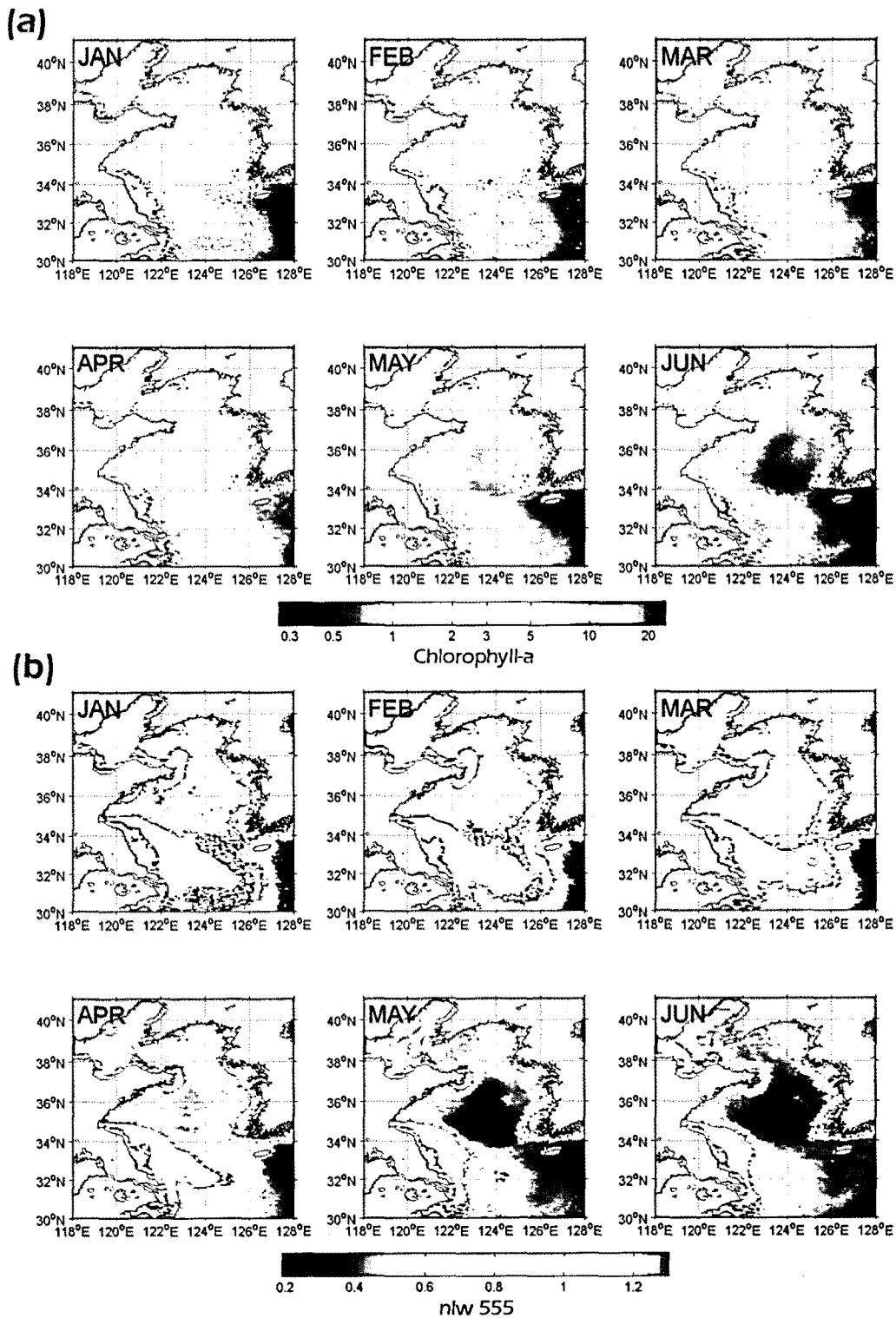


Fig. 2. Climatology (1998-2007) of (a) chlorophyll-a concentration (mg m^{-3}), and (b) normalized water leaving radiance ($\text{nIw cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) at 555 nm in the Yellow Sea from January to June. SeaWiFS OC4v4 standard algorithm was used for chlorophyll-a concentration.

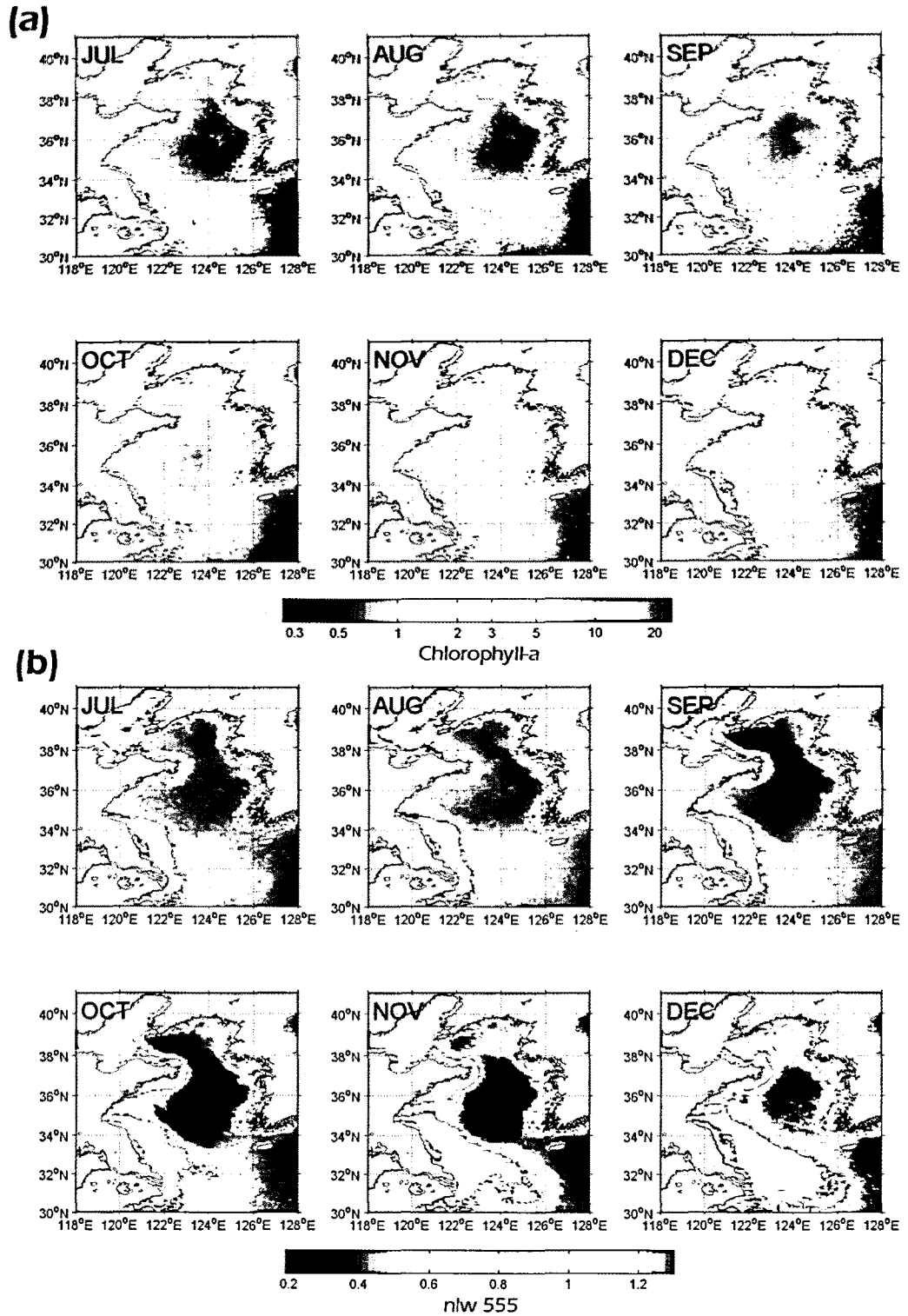


fig. 3. Climatology (1998-2007) of (a) chlorophyll-a concentration (mg m^{-3}), and (b) normalized water leaving radiance ($\text{nW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) at 555 nm in the Yellow Sea from July to December.

소-a 값은 연안해역의 부유사에 의해 심각하게 과대 추정되고 있으며 비교적 맑은 중부해역에서조차도 잘 맞지 않음을 알 수 있는데, 이는 부유물질의 농도에 크게 영향 받는다(혹은 부유물질 농도를 가장 잘 표현할 수 있는) SeaWiFS 5번째 밴드인 555 nm 파장대의 수출광량자료(nlw555)를 통해 확인할 수 있다(Fig. 2, b, 3b).

SeaWiFS 레벨-3 위성자료의 파장별 수출광량 자료는 매우 높은 값이 나오는 픽셀에 기준치(flagging)가 적용되어 포화된 일정한 값으로 표현되는데, 그림에서 연안해역 중 검붉은색으로 표현된 해역(nlw555) 1.27이 이에 속한다. nlw555를 보면, 중국측과 한반도 대부분의 연안은 연중 탁도가 매우 높은 것을 알 수 있으며, 특히 장강 북동쪽 해역은 특히 11-3월의 겨울철을 중심으로 매우 넓은 해역에 걸쳐 부유물질의 영향이 큼을 알 수 있다. 태안 앞바다의 경우에는, 5-9월의 여름철엔 탁도가 다소 낮아짐을 보여주며, 발해만 안쪽도 이 시기엔 탁도가 조금 낮아진다. SeaWiFS 표준알고리즘에 의한 엽록소-a 농도가 부유물질에 의해 오염(과대추정)되고 있음을 보여주는 증거로, Fig. 2와 3의 엽록소-a와 nlw555값의 월간 분포를 비교해 보면, 여름철 장강 입구 동쪽에서 제주도 서쪽으로 엽록소 농도가 높았던 해역의 nlw555 값이 상대적으로 높게 나타나지 않는 반면, 나머지 계절의 엽록소 농도는 대부분 부유물질에 의해 영향 받았음을 같은 시기의 nlw555 값 분포를 통해 알 수 있다.

네 가지 엽록소 알고리즘과 VGPM과 YSVGPM을 각각 사용해 추정된 황해 중부해역의 일 일차생산력과 연 일차생산력의 평균을 각각 Table 2에 정리하였다. SeaWiFS 표준 엽록소 알고리즘을 적용해 VGPM으로 계산한 일 일차생산력은 1,672 mgC m⁻² d⁻¹이었으며,

연간 일차생산력으로 환산하면 610.2 gC m⁻² yr⁻¹이었다. 이는 Sherman and Hempel (2009)이 추정된 값과 비슷한 수준이다. 표준 엽록소 알고리즘과 YSVGPM을 사용해 계산한 일차생산력은 1,142 mgC m⁻² d⁻¹ (416.9 gC m⁻² yr⁻¹)으로 VGPM PP와 비교해 30% 이상 감소하였다. YOC 알고리즘을 적용한 VGPMPP는 일 일차생산력이 559 mgC m⁻² d⁻¹, 연간 일차생산력이 203.9 gC m⁻² yr⁻¹이었으며, YSVGMPPP는 291 mgC m⁻² d⁻¹, 106.3 gC m⁻² yr⁻¹으로 약 두 배의 차이가 있었으며, 이 수치는 표준알고리즘에 의한 결과와 비교해, VGPMPP는 약 3분의 1, YSVGMPPP는 약 4분의 1밖에 안되는 값이다. TYOC 알고리즘에 의한 일차생산력 결과는 VGPMPP가 1,222 mgC m⁻² d⁻¹, 446.1 gC m⁻² yr⁻¹이었고, YSVGMPPP는 839 mgC m⁻² d⁻¹, 306.4 gC m⁻² yr⁻¹으로 역시 약 30% 정도 YSVGMPPP가 낮았다. 또한, YSVGMPPP의 경우, 표준알고리즘에 의한 값의 4분의 3 수준이며 YOC 알고리즘에 의한 결과값보다는 세 배나 높은 값이다. GOCI 알고리즘을 적용한 일차생산력 결과값은 VGPMPP가 438 mgC m⁻² d⁻¹, 159.8 gC m⁻² yr⁻¹, YSVGMPPP가 265 mgC m⁻² d⁻¹, 96.5 gC m⁻² yr⁻¹로 약 40% 낮아졌다. 이는 YOC 알고리즘과 비슷한 수치로 네 가지 알고리즘을 적용한 결과 가운데 가장 낮은 결과값을 나타냈다.

Figure 4는 TYOC와 YSVGPM을 적용하여 계산한 일차생산의 월별 값을 보여주고 있다. 봄철 황해 중부의 생산력은 최대 1,300 mgC m⁻² d⁻¹ 수준에 이르렀으며 4월에 식물플랑크톤 기초생산력이 최대가 된다. 반면, 수심이 낮은 연안해역과 전선역은 5월에 생산력의 최대값이 나타났으며, 전선역에선 연중 상대적으로 높은 값을 보이는 특징이 있었다. 5월 황해 중부에선 황해 투기장 해역의 높은 생산력이 뚜렷이 보이며, 또 다른 특징으로, 7-9월 여름시기의 생산력은 낮은 반면 11-3월 겨울철 생산력은 상대적으로 높게 나타났다.

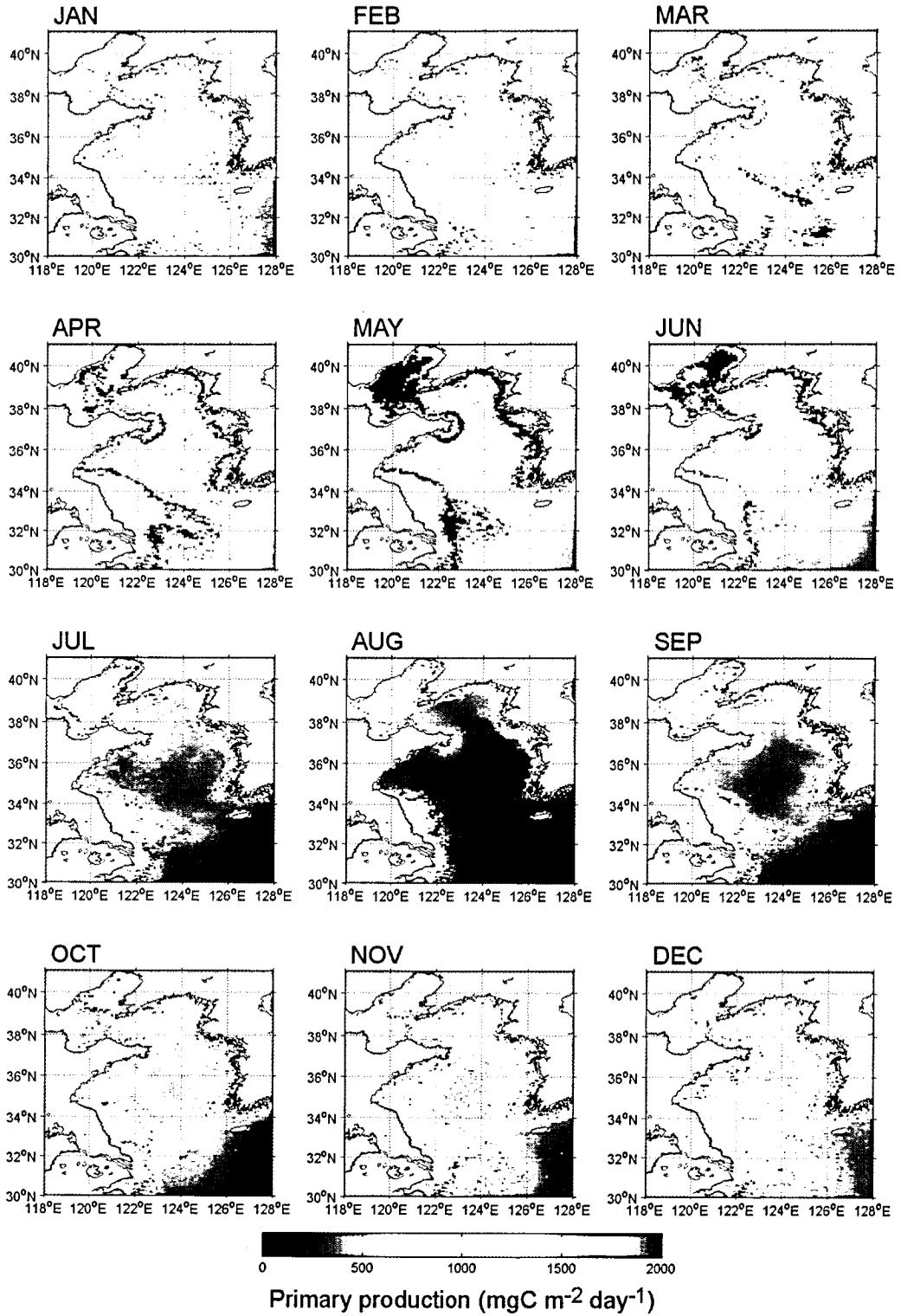
Figure 5는 네 가지 엽록소 알고리즘을 사용해 VGPM과 YSVGPM으로 각각 계산한 황해 중부해역의 월별 일차생산력(막대그래프)과, 사용된 엽록소 자료의 월별 평균(점선)을 같이 보여주고 있다. 우선, SeaWiFS 표준알고리즘에 의한 엽록소-a 농도는 겨울철도 봄철과 비슷한 수준으로 2 mg m⁻³ 이상의 높은 값을 보이

Table 2. Comparison of primary production in the central region of the Yellow Sea which were calculated by each chlorophyll-a algorithm. VGPMPP and YSVGMPPP

Chl-a algorithm	VGPM		YSVGPM	
	Daily †	Yearly †	Daily	Yearly
SeaWiFS standard	1672	610.2	1142	416.9
YOC	559	203.9	291	106.3
TYOC	1222	446.1	839	306.4
GOCI	438	159.8	265	96.5

† Units mgC m⁻² d⁻¹

† Units gC m⁻² yr⁻¹



g. 4. Climatology of primary production in the Yellow Sea from 1998 to 2007. TYOC algorithm for chlorophyll-a concentration and YSVGPM for PP calculation were used. Note that level-3 flagged pixels are excluded for calculation of PP.

고 여름철도 상대적으로는 낮으나 최소값은 여전히 높은 수준이었다. 이 알고리즘을 사용한 VGPMPP는 6월에 최대값을 보이고 여름철이 겨울철보다 생산력이 조금 높으며 10월에도 다시 생산력이 높아는 현상이 나타난다 (Fig. 5a). 같은 엽록소 표준알고리즘을 적용한 YSVGPMPP는 4월에 최대값을 보였고 8월에 최소값을 나타냈으며, VGPMPP와 비교해 봄 번성시기의 생산력도 다소 낮아 중부해역에서 최대 $2,000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 수준을 나타냈다(Fig. 5b). 결과적으로, YSVGPMPP는

VGPMPP와 비교해 겨울철 다소 높고 여름철에 많이 낮은 결과를 보여주었다(Fig. 5b).

두 번째, YOC 알고리즘에 의한 엽록소-a는 8월에만 최대값을 갖는 싱글모드 형태를 가지며, 봄, 가을철 번성의 계절성이 전혀 나타나지 않는다. 이 알고리즘을 적용한 VGPMPP도 비슷한 형태로 7월에만 최대값이 한번 나타나며, 여름철에는 높고 겨울철에는 매우 낮아졌다(Fig. 5c). YSVGPMPP는 최대값이 나타나는 시기가 5월로 바뀌고 8월에 낮아졌다가 9-10월에 다시 조금 높

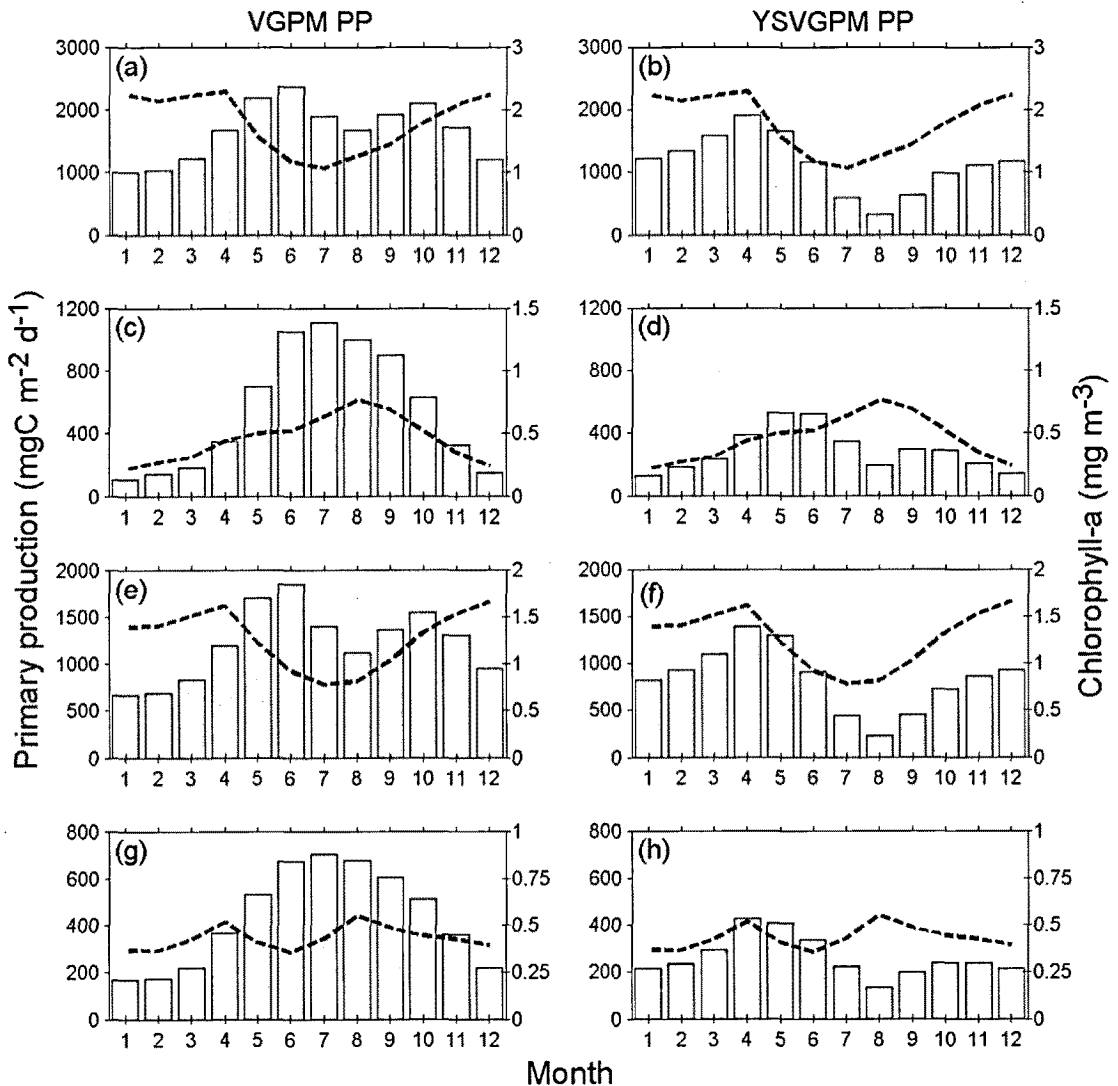


Fig. 5. Variations of primary production (PP; bars) and chlorophyll-a concentration (dotted lines) in the central region of the Yellow Sea (see Fig. 1B for the region). Chlorophyll-a data were used by (a, b) SeaWiFS standard, (c, d) YOC, (e, f) TYOC, and (g, h) GOCI for calculation of primary production, respectively. VGPM PP (a, c, e, g) and YSVGPM PP (b, d, f, h). All data showed monthly climatology of ten year mean. Note that the vertical axes have different scale.

아지는 분포를 나타내었다. 같은 엽록소 자료를 사용했음에도 생산력의 계절변화는 쌍봉(bimodal) 형태가 나타났다(Fig. 5d). 세 번째, TYOC 알고리즘에 의한 엽록소-a는 SeaWiFS 표준알고리즘과 비슷한 패턴을 보이거나 절대값이 다소 낮고 1-3월의 겨울철에도 상대적으로 다소 낮아진 형태가 나타나며, VGPMP는 6월과 10월에 두 번 피크가 나타나는 쌍봉 형태를 보이며 1, 2월이 가장 낮았다(Fig. 5e). YSVGPMPP의 경우엔 4월에 최대값이 한 번 나타나고 8월에 가장 낮았으며 12월에 다시 높은 계절변화를 보여주었다(Fig. 5f). TYOC 알고리즘을 적용한 생산력 결과는 엽록소 자료와 마찬가지로

전반적으로 표준알고리즘을 적용한 경우와 계절변화 패턴이 다르지 않았다. 네 번째로, GOCI 알고리즘에 의한 엽록소-a는 4월과 8월 두 번의 모드가 나타나는 형태가 가장 뚜렷했으나 최대값과 최소값의 차이가 아주 작았으며, 최대값이 나타나는 시기의 절대값도 0.5 mg m^{-3} 수준으로 식물플랑크톤 번성시기의 생물량으로 보기에 너무 낮은 값이었다. 이 GOCI 알고리즘을 적용한 VGPMP 결과는 앞서의 YOC 알고리즘을 적용한 경우와 엽록소 자료가 다름에도 불구하고 생산력 계절변화의 패턴이 크게 다르지 않았으며(Fig. 5g), YSVGPMPP는 최대 시기가 4월에 나타난 것을 제외하면, 계절변화가

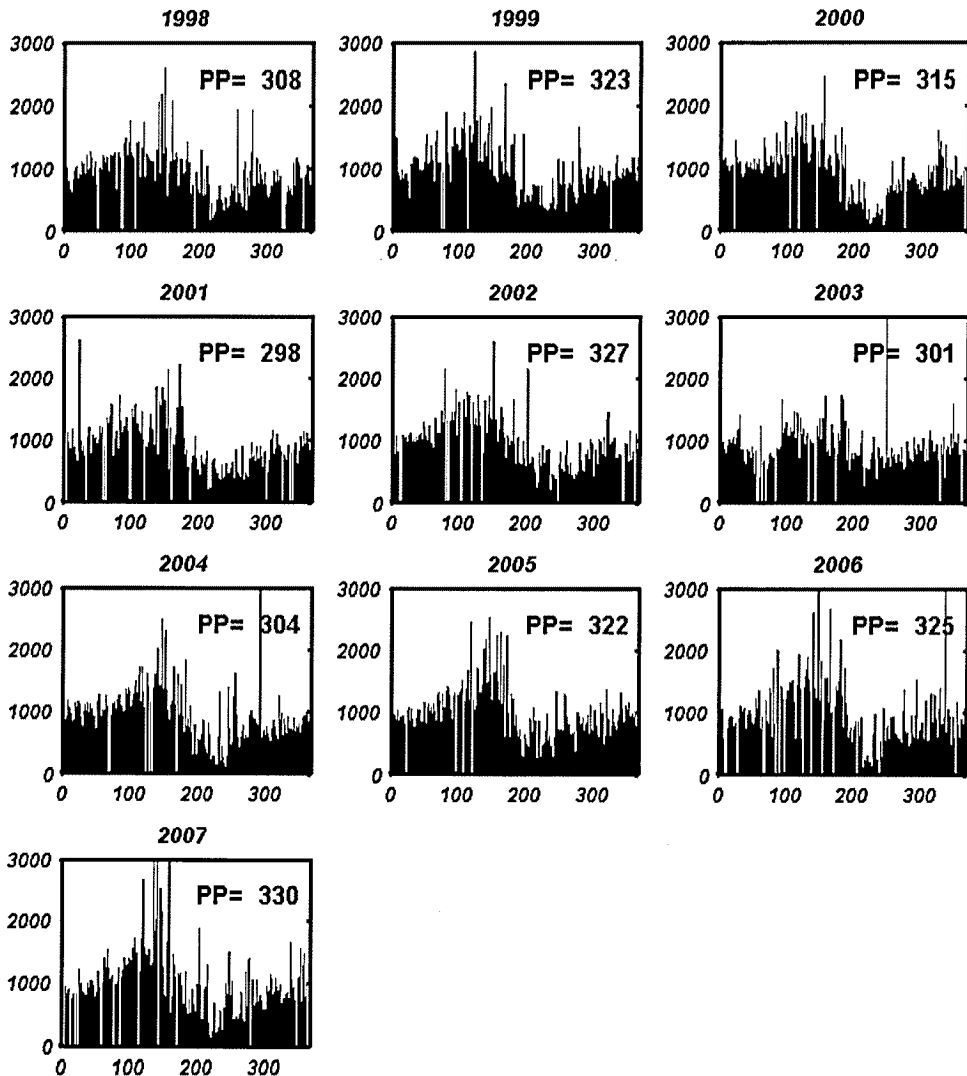


Fig. 6. Average daily (time series) and annual primary production of the Yellow Sea from 1998 to 2007. TYOC algorithm for chlorophyll-a concentration and YSVGPM for PP calculation were used.

뚜렷하지 않은 모습을 보였다(Fig. 5h).

TYOC 알고리즘과 YSVGPM을 이용한 1998년부터 2007년까지 연 평균 일차생산력은 2001년 최소 298 $gC\ m^{-2}\ yr^{-1}$ 에서 2007년 최대 330 $gC\ m^{-2}\ yr^{-1}$ 범위 값을 보였다(Fig. 6). 큰 경년변동을 보이진 않았으나 생산력이 가장 낮았던 2001년과 2003년은 다른 해와 달리 봄 번성 시기의 생산력이 그다지 높지 않았던 것이 전체 연 평균을 낮춘 것으로 보인다.

4. 토 의

위성자료를 이용한 황해의 일차생산력 추정 알고리즘을 개선하기 위해서는 우선적으로 비교적 정확한 실측 정보가 바탕이 되어야 한다. 하지만, 기존 문헌에 의존한 황해의 일차생산력 결과를 종합해 보면, 대부분의 조사결과가 한국연안에 치우쳐 있으며 황해 중부의 자료는 턱없이 부족한 실정이다. 그나마도 90년대 후반 이후부터는 황해에서 일차생산력 측정이 거의 이루어지지 않거나 논문으로 자료가 발표되지 않았다. 또한, 중국측의 자료는 대부분 중국 국내논문에서 실려 자료를 구하기 어려운 점이 있다. 앞서 서론에서 언급한 바와 같이 황해 전체의 일차생산력에 대해서는 아직까지 조사 자료가 부족하여 정확한 수치를 알기 어려우나, 기존 문헌들에 나와 있는 결과를 종합해 볼 때 경기만이나 발해만 등의 만이나 연안해역에서 높은 생산력을 보인다. 계절별로는 봄철과 가을철 높은 생산력 수치를 나타내지만 흥미로운 점은 여름철 조사된 생산력도 봄, 가을에 비해 별로 낮지 않다는 것이다(Table 1). 이들 실측결과와 본 연구에서 위성자료를 이용한 결과를 비교해 보면, TYOC 알고리즘을 적용한 일차생산력 결과치가 가장 실측자료에 가까울 것으로 판단되었으며, YOC나 GOCI 알고리즘을 적용한 경우엔 2배 이상 낮은 수치를 보였다. 또한, SeaWiFS 엽록소 표준알고리즘을 그대로 적용한 결과는 상당히 높은 값이 나왔고 YSVGPM을 사용하더라도 실측 결과들 보다는 두 배 가량 높은 수치였다.

황해 일차생산력 추정의 오차를 유발하는 첫 번째 요인으로 식물플랑크톤 생물량을 대변하는 엽록소-a 농도를 들 수 있다. SeaWiFS 표준알고리즘이 엽록소-a

농도를 과대 추정하는 현상은 황해의 광학성질이 대양의 맑은 해역과 다르기 때문이다. 황해는 전형적인 Case 2 해역(Morel and Prieur, 1977; IOCCG, 2000)으로서, 경기만이나 변산반도 앞바다, 한반도 서남해안 등지와 함께 중국 장강 북동부해역은 수심이 얕고 강한 조류와 강수의 방출로 계절에 상관없이 항상 부유물질이 풍부한 해역이다. 따라서, 555 nm의 녹색대 밴드를 사용하는 SeaWiFS 엽록소 표준알고리즘(O'Reilly *et al.*, 2000)은 이 해역의 높은 부유사 농도에 의한 영향이 엽록소-a 농도 추정에 상당한 영향을 줄 수 밖에 없다. 또한, 가시광선의 청색영역에서는 용존유기물에 의한 흡광이 크게 발생해 엽록소에 의한 흡광 신호와 구별하기 어렵다(Gong *et al.*, 2007). 이러한 이유로, SeaWiFS 엽록소 표준알고리즘을 사용한 일차생산력은 연안역에서 특히 과대 추정된다(Fig. 2). 이를 보완하기 위해 한-중-일 연구자들이 공동으로 황해에 적합한 알고리즘을 개발하기 위해 노력 중이며 그 중간 결과로 YOC와 TYOC 알고리즘이 만들어졌다. 또한, GOCI 알고리즘도 실측자료에 근거해 황해에 적합한 알고리즘을 개발중 있으며(문정인 외, 2008, 2010), 더 많은 실측 자료와 위성자료의 비교자료가 생기면 보다 적합한 알고리즘 개발이 현실화 될 것으로 예상된다.

황해 일차생산력 추정의 오차를 유발하는 두 번째 요인은 일차생산력 알고리즘이다. VGPM은 주로 대양 자료를 토대로 만들어졌다. Yoo *et al.* (2008)의 YSVGPM은 수온 범위가 약 7°C도에서 27°C까지의 계절변화를 가지는 총 23개 수온-광합성매개변수 실측 자료를 가지고 Behrenfeld and Falkowski (1997)의 VGPM이 추정하는 광합성매개변수 P_{opt}^B 를 새롭게 추정하였다. 기존 VGPM은 여름철 성층이 강한 시기의 광합성매개변수를 과대 추정하는 결과를 유발할 수 있는데, 수온이 상승하고 성층이 강화되면 표층의 영양염이 고갈되어 식물플랑크톤의 광합성 능력이 감소하기 때문이다(Falkowski and Raven, 2007). 이 단점을 일부 보완한 YSVGPM은 기존 VGPM과 비교해 수온이 12°C 보다 낮을 때 VGPM 보다 높은 P_{opt}^B 값이 추정되고 수온이 높을 때는 VGPM으로 추정된 P_{opt}^B 보다 낮게 추정되는 결과를 보여, 일차생산력의 월간 분포도 계절변화가 보다 뚜렷해지는 결과를 나타냈다.

여러 알고리즘을 통해 계산된 황해의 엽록소-a 농도

추정치의 절대값이 정확한가 하는 사실 못지 않게 인공 위성으로 측정된 자료가 식물플랑크톤 번성과 소멸의 계절변화를 잘 재현하는가 하는 점도 중요하다. 네 가지 엽록소 알고리즘에 의한 황해 중부해역 엽록소-a 농도의 계절변화 패턴은 모두 달랐다. SeaWiFS 표준알고리즘을 사용한 경우 겨울철도 봄철과 비슷한 수준으로 높은 값을 보이고 여름철도 여전히 높은 수준이었으며 (Fig. 5a), YOC 알고리즘에 의한 엽록소-a는 8월에만 최대값을 갖는 단일 봉우리 형태로 봄, 가을철 번성의 계절성이 전혀 나타나지 않았다 (Fig. 5b). TYOC 알고리즘에 의한 엽록소-a는 SeaWiFS 표준알고리즘과 비슷한 계절변화를 보이나 절대값이 다소 낮고, 1-3월의 겨울철에도 상대적으로 다소 낮아졌으나 (Fig. 5c), 실측치에 비해 훨씬 높은 값을 보이고 있다. GOCI 알고리즘에 의한 엽록소-a는 4월과 8월 두 번의 모드가 나타나는 쌍봉 형태는 가장 뚜렷했으나 최대값과 최소값의 차이가 너무 작았고, 최대값이 나타나는 시기의 절대값도 너무 낮은 값이었다 (Fig. 5d).

일차생산력의 경우 식물플랑크톤 생물량 외에 광량과 수온의 변화 등 다른 요인이 작용하기 때문에 엽록소 농도와는 다른 계절변화를 보이게 된다. VGPM 및 YSVGPM으로 각각 계산한 월별 일차생산력의 계절분포는, 우선, SeaWiFS 표준알고리즘을 사용한 VGPM PP는 6월에 최대값을 보이고 여름철이 겨울철보다 생산력이 조금 높았는데 (Fig. 5a), 이른 여름철인 6월에 최대값이 나타나고 여름철 생산력이 낮아지지 않은 이유는, 수온으로부터 추정되는 광합성매개변수 P_{0pt} 값이 과대 추정되었기 때문으로 생각된다. YSVGPMPP는 최대값을 나타내는 시기가 4월로 바뀌었고 8월에 최소값을 나타냈다. 결과적으로, VGPMPP와 비교해 생산력이 겨울철 다소 높고 여름철에 많이 낮았다 (Fig. 5b). YOC 알고리즘을 적용한 VGPMPP는 7월에 최대값이 한 번 나타나 여름철 높고 겨울철이 매우 낮아졌으며 (Fig. 5c), YSVGPMPP는 최대값이 나타나는 시기가 5월로 바뀌고 8월에 낮아졌다가 9-10월에 다시 조금 높아지는 쌍봉 형태가 나타났다 (Fig. 5d). 세 번째, TYOC 알고리즘을 적용한 VGPMPP는 6월과 10월에 두 번 최대값이 나타나는 쌍봉 형태를 보이며 1, 2월이 가장 낮았고 (Fig. 5e), YSVGPMPP의 경우 4월과 12월에 높은 계절변화를 나타냈다 (Fig. 5f). 네 번째로, GOCI 알고리

즘을 적용한 VGPMPP 결과는 앞서의 YOC 알고리즘을 적용한 경우와 엽록소 자료가 다름에도 불구하고 생산력 계절변화의 패턴이 크게 다르지 않았으며 (Fig. 5g), YSVGPMPP는 최대 시기가 4월에 나타난 것을 제외하곤 계절변화가 뚜렷하지 않은 모습을 보였다 (Fig. 5h).

위성자료를 활용한 일차생산력 추정은 실측자료만으론 한계가 있는 장기변동을 파악하기 용이하다는 장점이 있다. Figure 7에서 TYOC 및 YSVGPM으로 계산한 황해 일차생산력의 최근 십 년 사이의 변화를 2개 기간 (1998-2002 및 2003-2007)으로 나누어 비교하였다. 그림에서 붉은색 영역은 1998년에서 2002년까지 시기 보다 2003년에서 2007년까지의 생산력이 증가한 영역이며 청색 영역은 감소한 해역을 표현하고 있다. 전반적인 특징은 12월에서 3월까지의 겨울철 일차생산력은 최근 5년이 그 전 시기보다 다소 감소했으며 그 밖의 시기엔 대체로 증가한 양상을 보이나, 중국 장강 입구의 경우엔 8월을 제외하곤 대체로 감소하는 패턴을 보여 산사담 건설 후의 부유사나 영양염류 감소의 영향이 아닌가 생각된다. 또한, 4월에 수심이 깊은 황해 중앙부에서 주변이 감소한 패턴을 보임에도 불구하고 생산력이 크게 증가한 모습을 보이는데 이는 식물플랑크톤 번성 시작시기가 빨라졌을 것이라 추정할 수도 있다. 그러나, 이 현상을 설명하기 위해서는 다른 여러 요인들을 고려한 보다 자세한 분석이 요구된다.

5. 결론

위성자료를 이용한 광역 일차생산력 추정모델인 VGPM을 이용하는데 있어, 네 가지 입력자료인 엽록소-a, 광합성매개변수, k_{490} , PAR 중, 본 연구에서는 황해 일차생산력을 추정하는데 있어 가장 큰 오차로 작용할 것으로 예상되는 엽록소-a 알고리즘과 일차생산 알고리즘을 달리 적용했을 때의 차이를 살펴보았다. YOC, TYOC, GOCI 알고리즘은 모두 SeaWiFS 표준알고리즘의 연안역 과대추정을 일부 해결하였으나 식물플랑크톤의 계절 번성/소멸을 잘 재현하진 못했다. 또한, YSVGPM에서 새로 적용한 광합성매개변수를 사용한 일차생산력 월별 분포는 최대값이 4월에 나타났고 (YOC의 경우엔 5월) 여름철 과대 추정 되는 문제를 일부 해

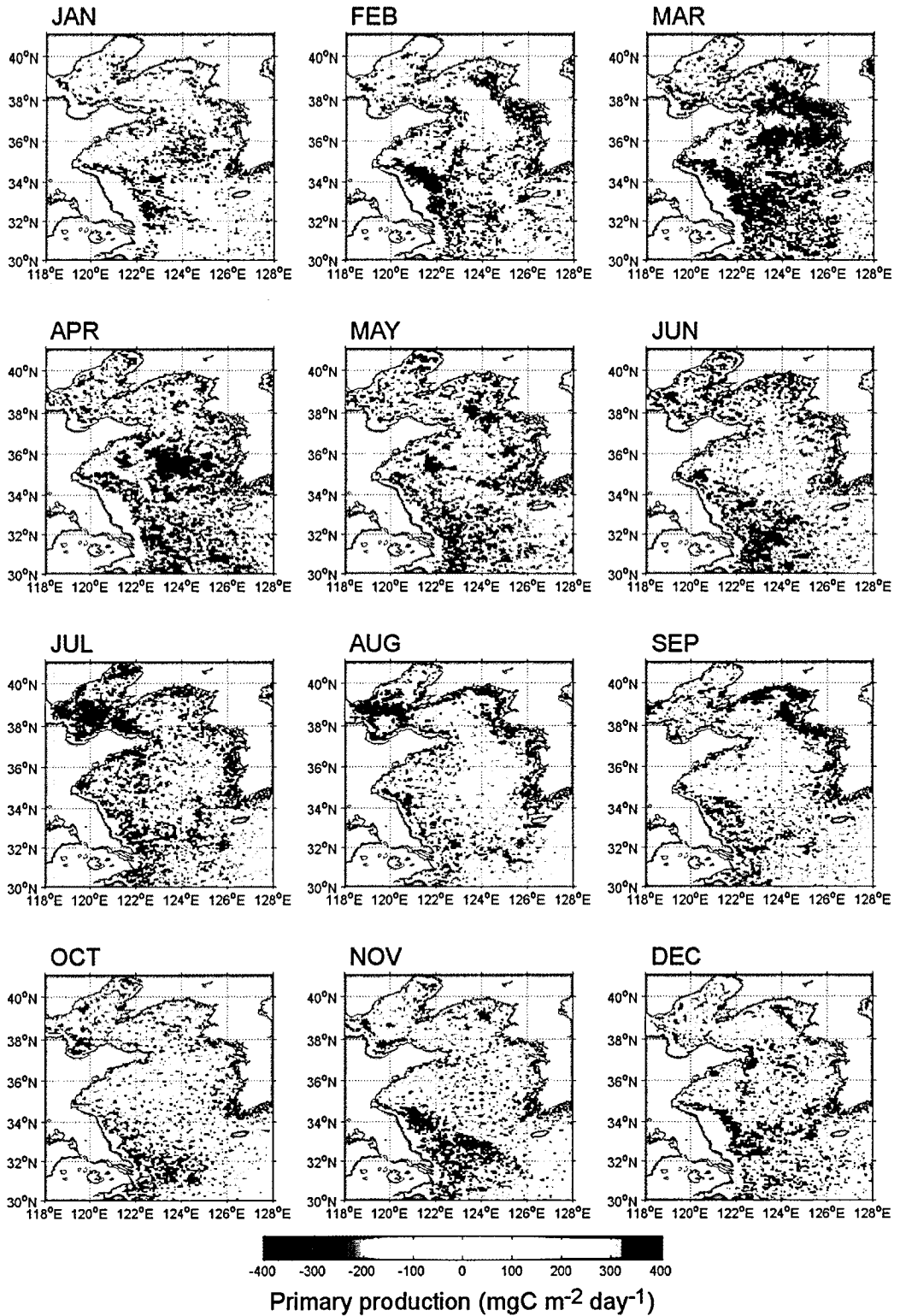


Fig. 7. Trends of monthly averaged primary production in the Yellow Sea during recent decade. Differences were calculated from monthly climatology of AVGPMP during 2003 to 2007 minus that PP during 1998 to 2002.

결했으나 겨울철이 너무 높게 추정되는 한계가 있었다. 또한, 식물플랑크톤의 수층 내 수직분포 파악도 일차생산력 추정에 있어 중요하다. 황해 중부는 여름철 강한 성층으로 인해 표층 혼합층 수심이 얕아지기 때문에 엽록소 최대층이 더 중요한 변수로 작용할 수 있는데, 박지수(2000)에 의하면, 엽록소 최대층을 무시할 경우 일차생산력 산출의 오차는 17.7-30.1%에 이를 수 있다. 마지막으로, 본 연구에서는 복잡한 연안역을 제외한 황해 중부를 대상으로 각 알고리즘의 차이를 비교하였으나, 연중 탁도가 높은 연안 해역과 장강의 영향을 받는 해역에 적합한 엽록소 알고리즘 개선과 함께 이 해역에 적합한 광합성 매개변수의 정확한 산출은 황해 전체 일차생산력을 추정하는데 있어 매우 중요한 과제로 남아있다. 이렇듯 현재의 수준으로 황해 일차생산력을 추정하는 데는 여전히 많은 한계가 있지만, 앞으로 해양정지궤도 위성센서 GOCI 자료를 활용하게 되면 하루 8번 관측으로 실측자료와 위성자료의 비교자료를 더 많이 확보할 수 있어 엽록소 알고리즘 개선과 함께 황해의 광학성질을 파악하는 데 있어서도 많은 발전을 이룰 수 있을 것이며, 보다 정확한 황해지역의 일차생산력을 추정할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 논문을 심사해주신 두 분의 심사자께 감사드립니다. 본 연구는 국토해양부 연구개발사업인 “정지궤도 해색위성 활용연구지원” 사업(PM55660)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

강연식, 최중기, 정경호, 박용철, 1992. 서해 중동부 연안수역과 경기만에서 일차 생산력과 동화계수에 관한 연구. 한국해양학회지, 27(3): 237-246.
문정언, 유주형, 안유환, 민지은, 최중기, 2008. 황동중국해 엽록소 산출 알고리즘 개발에 관한 연구. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, 제주 ICC, 5월 29일-30일, pp.202.

문정언, 안유환, 유주형, P. Shanmugam, 2010. GOCI 해양환경분석 알고리즘 개발. 대한원격탐사학회지(본 특별호).
박지수, 2000. 춘계 황해 식물플랑크톤의 수직분포와 일차생산력. 인하대학교 석사학위논문.
유신재, 신경순, 1995. 태안반도 연안에서의 일차생산력 특성. 해양연구, 17(2): 91-99.
정경호, 박용철, 1988. 서해 경기만의 기초생산력 및 질소계 영양염의 재생산에 관한 연구. 한국해양학회지, 23(4): 194-206.
정창수, 김석현, 강동진, 홍기훈, 1991. 황해 중심부 해역의 하계 일차생산력, 영양염류 및 용존산소 동태에 관한 연구. 황해연구, 4: 89-102.
조성환, 2005. 황해의 해양환경과 식물플랑크톤 군집의 생태특성. 부경대학교 박사학위논문.
최중기, 박용철, 김용철, 이영철, 손승규, 황학진, 한범석, 정창수, 1988. 서해 연안 어장의 생산력 조사. 수진연구보고, 42: 143-168.
최중기, 1991. 황해 중·동부 연안 수역의 조석전선이 식물 플랑크톤 생산력과 분포에 미치는 영향. 한국해양학회지, 26(3): 223-241.
Antoine, D., J. M. Andre and A. Morel, 1996. Oceanic primary production 2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(1): 57-69.
Behrenfeld, M. J. and P. G. Falkowski, 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 42(1): 1-20.
Cho, B. C., J. K. Choi, C. S. Chung and G. H. Hong, 1994. Uncoupling of bacteria and phytoplankton during a spring diatom bloom in the mouth of the Yellow Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 115(1-2): 181-190.
Choi, J. K., J. H. Noh, K. S. Shin and K. H. Hong, 1995. The early autumn distribution of chlorophyll-a and primary productivity in the Yellow Sea, 1992. *The Yellow Sea*, 1: 68-80.
Falkowski, P. G., 1994. The role of phytoplankton

- photosynthesis in global biogeochemical cycles. *Photosynthesis Research*, 39: 235-258.
- Falkowski, P. G. and J. A. Raven, 2007. Aquatic Photosynthesis. 2nd Ed., Princeton University Press.
- Field, C. B., M. J. Behrenfeld, J. T. Randerson and P. Falkowski, 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281: 237-240.
- Gong, G. C., C. C. Hung and J. Chang, 2007. Reply to comment by Jinchun Yuan et al. on "Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: Effect of the Tree Gorges Dam?" *Geophysical Research Letters*, 34, L14610, doi:10.1029/2007GL029633.
- Hardman-Mountford, N. J., T. Hirata, K. A. Richardson, and J. Aiken, 2008. An objective methodology for the classification of ecological pattern into biomes and provinces for the pelagic ocean. *Remote Sensing of Environment*, 112: 3341-3352.
- IOCCG, 2000. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. IOCCG Report No 3.
- Longhurst, A., S. Sathyendranath, T. Platt and C. Caverhill, 1995. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *Journal of Plankton Research*, 17(6): 1,245-1,271.
- McClain, C. R., M. L. Cleave, G. C. Feldman, W. W. Gregg, S. B. Hooker and N. Kuring, 1998. Science quality SeaWiFS data for global biosphere research. *Sea Technology*, 39(9): 10-16.
- Morel, A., and L. Prieur, 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22(4): 709-722.
- Nishimura, S., 1983. Okhotsk Sea, Japan Sea, East China Sea. In: Estuaries and enclosed seas. Elsevier Scientific Publishing Co. Press, pp. 375-401.
- O'Reilly, J. E., S. Maritorena, B. G. Mitchell, D. A. Siegel, K. L. Carder, S. A. Garver, M. Kahru and C. McClain, 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103(c11): 24,937-24,953.
- O'Reilly, J. E., et al., 2000. Ocean-color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: Hooker, S.B., and E.R. Firestone. (Eds.), SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analysis, Part 3. National Aeronautics and Space Administration Technical Memorandum. 2000-206892, 11:9-23.
- Sherman, K., and G. Hempel, 2009. The UNEP Large Marine Ecosystem Report: A perspective on changing conditions in the world's Regional Seas. UNEP Regional Seas Report and Studies No. 182. United Environment Programme. Nairobi, Kenya.
- Siswanto, E., J. Tang, Y.-H. Ahn, J. Ishizaka, S. Yoo, S.-W. Kim, Y. Kiyomoto, K. Yamada, C. Chiang, and H. Kawamura, 2010. Ocean color algorithms to retrieve chlorophyll-a, total suspended matter, and colored dissolved organic matter absorption coefficient in the Yellow Sea and East China Sea. In preparation.
- Son, S., J. Campbell, M. Dowell, S. Yoo and J. Noh, 2005. Primary production in the Yellow Sea determined by ocean color remote sensing. *Marine Ecology Progress Series*, 303: 91-103.
- Tang, Q., X. Jin, J. Wang, Z. Zhuang, Y. Cui and T. Meng, 2003. Decadal-scale variations of ecosystem productivity and control mechanisms in the Bohai Sea. *Fisheries Oceanography*, 12: 223-233.
- Treguer, P. and P. Pondaven, 2002. Climate changes and the carbon cycle in the Southern Ocean: a step forward. *Deep-Sea Research II*, 49: 1,597-1,600.

- Wu, Y. L., Y. J. Guo and Y. S. Zhang, 1995. Distributional characteristics of chlorophyll-a and primary productivity in the Yellow Sea. *The Yellow Sea*, 1: 81-92.
- Xia, C., F. Qiao, Y. Yang, J. Ma and Y. Yuan, 2006. Three-dimensional structure of the summertime circulation in the Yellow Sea from a wave-tide-circulation coupled model. *Journal of Geophysical Research*, 111, C11S03, doi:10.1029/2005JC003218.
- Yoo, S., and J. Park, 1998. Bio-optical properties in the Yellow Sea. *Journal of Korean Society of Remote Sensing*, 14(3): 285-294.
- Yoo, S., Y.-H. Ahn and J. Park, 2008. A depth-resolved primary production model for stratified water in the Yellow Sea. *Proceedings of SPIE*, Vol. 7150, 71500Z.